

控制与决策

Control and Decision

全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化

王瑞琦, 陈光宇, 梁娜, 吴杰

引用本文:

王瑞琦,陈光宇,梁娜,吴杰. 全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2360–2368.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1813>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双不确定相依竞争失效模型的可靠性评估

Reliability evaluation of dependent competitive failure models with bi-uncertainty

控制与决策. 2022, 37(3): 685–689 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1487>

基于随机系数回归模型的退化过程及维修策略

Degradation process and maintenance planning based on random coefficient regression model

控制与决策. 2021, 36(3): 754–760 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1087>

两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型

Multi-component system state space partition model based on Markov process

控制与决策. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型

Joint decision model of Seru production system balancing considering lot-splitting

控制与决策. 2021, 36(10): 2517–2527 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0167>

全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化

王瑞琦, 陈光宇[†], 梁娜, 吴杰

(电子科技大学 经济与管理学院, 成都 611731)

摘要: 单元退化情形下, 考虑全寿命周期的大规模系统可靠性设计与预防性维修策略的综合优化问题将变得更为复杂. 针对单元失效服从威布尔分布的情形, 考虑多单元联合的预防性维修模式, 构建可靠性约束下大规模系统全寿命周期成本优化模型. 单元数量众多带来的组合规模指数增长问题将导致非线性择优困难, 利用遗传算法编程快速求解全局最优解, 包括设计阶段的单元可靠性和使用阶段的系统预防性维修周期. 最后通过典型算例分析验证模型与算法的正确性和有效性, 探究维修改善因子、单元可靠性和预防性维修周期等决策变量间的相互关系. 研究成果有助于简化系统工程师的可靠性工程设计过程, 具有一定的理论和应用价值.

关键词: 退化的大规模系统; 全寿命周期成本; 预防性维修; 优化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1813

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王瑞琦, 陈光宇, 梁娜, 等. 全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2360-2368.

Preventive maintenance optimization for deteriorating large-scale systems in life-cycle perspective

WANG Rui-qi, CHEN Guang-yu[†], LIANG Na, WU Jie

(School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Under the condition of unit degradation, the comprehensive optimization research on the large-scale system reliability design and the preventive maintenance strategy considering the life-cycle becomes more complicated. For the case that unit failure obeys Weibull distribution, considering the multi-unit preventive joint maintenance model, the life-cycle cost optimization model of large-scale system under reliability constraint is constructed. The problem of exponential growth of combination size caused by the large number of units leads to the difficulty of nonlinear optimization. Genetic algorithm programming is used to solve the global optimal solution, including the unit reliability in the design stage and the system preventive maintenance period in the operation stage. Finally, through the analysis of typical examples, the correctness and effectiveness of the model and algorithm are verified, and the relationship among decision variables such as the maintenance improvement factor, the unit reliability and the preventive maintenance cycle is explored. The research results are helpful to simplify the process of reliability and maintainability integrated design optimization for system engineers and have certain theoretical and application value.

Keywords: deteriorating large-scale systems; life-cycle cost; preventive maintenance; optimization

0 引言

很多大型系统有一个共同的特征, 都可以被解耦或分割成若干相互关联的单元或小规模系统, 这些单元由相同的目标或约束控制, 通过共享资源实现特定的功能, 这样的大型系统统称为大规模系统 (large-scale system)^[1]. 例如, 风电场包含几十或几百

个风力涡轮机, 单个风力涡轮机都可看作独立单元, 整个风电场是一个大规模系统^[2]; 我国的神光装置^[3], 每个束组都可视为独立的小规模系统. 这些大规模系统建造和运行成本很高, 长期来看, 不同的维修策略对系统全寿命周期成本 (life cycle cost, LCC) 影响明显. 因此, 从 LCC 视角, 开展大规模系统可靠性与维

收稿日期: 2020-12-25; 录用日期: 2021-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71531003); 国防基础科学研究计划项目; 四川省创新推广应用于服务基地建设项目 (2017IM010700).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: chenguangyu@uestc.edu.cn.

修决策问题研究显得非常必要。

大规模系统大多假设单元退化服从威布尔分布^[2-4],单元间存在经济依赖性^[5]。经济依赖性是指单元退化情形下多单元联合维修(joint maintenance)的成本会低于各单元独立维修成本之和。联合维修是结合某些策略和标准来优化的维修活动,从而实现节省维修成本的目的^[6]。大规模系统的维修任务需要一系列活动(如人员移动、拆卸、设备租赁),最适用于联合维修^[6-7],比如海洋石油立管系统^[8]、风力涡轮系统^[9]和供水系统^[10]等。但上述维修策略研究仅考虑单元“修复如新”,还未考虑不同维修程度的情形。

不同的维修程度包括:最小维修(修复如旧)、完美维修(修复如新)、非完美维修(修复到年轻状态)^[11]。对于可修复系统,系统每次维修不需要完全更新,这种情况称为非完美维修^[12]。Yang等^[4]在对5个规模的风力涡轮系统研究时指出,尽管非完美维修的预防性维修次数较多,但是可以节省大量总成本。李志强等^[13]在研究某可靠度要求很高的导弹系统时,用实际工程数据证明非完美维修更能节约成本,并指出优化单元的维修次数是优化系统维修策略的有效条件。

非完美维修策略的优化通常考虑固定周期^[14]、以役龄为基础^[15-16]、基于失效约束^[17]、非完美维修联合延迟处理^[18-19]以及多失效模式的维修模型^[20],其中最常用的是虚拟役龄模型,通常由系统的故障率和改善因子来表征。从维修成本视角出发,Park等^[21]认为非完美的预防性维修周期受到改善因子、单元失效分布函数、检测成本和替换成本等多参数影响;王金贺等^[22]在研究同质大规模的风电场系统时,认为改善因子影响系统可靠性。但是以上研究均没有从LCC视角考虑。

在LCC视角的维修策略优化方面,Öner等^[23]提出关键单元的可靠性水平影响系统寿命的各个阶段,制定维修策略应考虑全阶段优化。大规模系统寿命

全阶段的维修策略优化属于组合择优问题,单元数量庞大要求高效的算法遍历所有可行解。Tian等^[24]在优化多单元系统LCC时指出,用遗传算法进行全局优化可以避免目标函数不够良好的数学性质。目前,LCC的建模和计算可分为基于系统结构或单元数量的仿真建模^[25]和基于系统失效状态的数学建模^[26-27]。通常选择遗传算法、粒子群算法、神经网络等仿生算法求解。

遗传算法(genetic algorithm, GA)利用自适应惩罚搜索解空间,可以更好地解决组合择优问题。Levitin等^[28]最早运用GA全局收敛性较强的优势解决系统的可靠性优化设计问题。Coit等^[29]指出,当单元失效服从威布尔分布时,使用GA仅需形状参数找出全局最优解,无需尺度参数及系统任务时间,同时组合择优过程中的所有可行解可按预设的算子突变率进行筛选,以防止过早地收敛到局部最优解。在非线性优化问题方面,Tian等^[30]认为GA存在非整型参数全局收敛的不稳定性问题,特别适用于求解整型的优化模型。李婧等^[31]在研究复杂系统的可用性和经济性时,提到可行解随系统层次和单元数量的增加呈指数级增长,GA作为一种启发式搜索算法,对目标函数的可导性和连续性要求较低,且全局收敛性较快,适用于较大规模系统的优化。

本文从LCC视角考虑单元退化情形,研究大规模系统可靠性与预防性联合维修策略的优化问题。在可靠性约束下,研究改善因子与其他维修决策变量的影响关系;应用遗传算法,编程求解大规模系统的LCC优化模型;最后结合某大规模系统的真实数据,验证模型的正确性和有效性,揭示维修相关的决策变量之间内在规律。本研究在大规模系统可靠性设计与优化方面具有一定的理论和应用价值。

1 系统描述与失效率模型

本文涉及符号及说明如表1所示。

表1 符号与说明

符号	说明	符号	说明
D	系统检测周期	C_D	系统设计成本
T_{PM}	系统预防性维修周期	C_M	系统制造成本
k	预防性维修间的检测次数($k = 1, 2, \dots$)	$C_{W(sys)}$	系统维修成本
ρ	维修改善因子	$f_i(t)$	$\lambda_i(t)$ 的概率密度函数
$\lambda(t)$	无预防性维修的单元失效率	$[x]$	小于 x 的最大整数
$\lambda_i(t)$	第 i 次预防性维修后的单元失效率	N	系统单元数量或系统规模
$\lambda_{S_i}(t)$	第 i 次预防性维修后的系统失效率	T	系统运行时间或工作次数
R_i	第 i 次预防性维修后的系统可靠性		

1.1 系统描述

大规模系统通常包含大量同质单元,每个单元的退化过程是独立均匀的,这表示每个单元都随着时间以相同的定律随机退化^[2].

大规模系统的随机预防性维修周期已被证明渐近收敛于固定值^[32],由于定期维修易管理和易实施的特点,每个单元可以固定地检测周期 D 的倍数进行预防性维修^[23],即 k 次定期检测开展一次预防性联合维修.预防性维修活动只在检测期间开展,包含检查系统是否正常运行、维修即将失效的单元和替换已失效的单元.

一般而言,单元退化过程是一个连续的随机过程,威布尔分布可以广泛适用并描述这个随机过程.沿用“单元的失效时间等效于失效次数”^[33]这一方法,将系统工作时间 T 等效为工作次数,不仅贴近实际大规模系统的工作情况,而且有利于算法的收敛处理.

上述单元同质、退化独立、退化服从威布尔分布等假设在文献[2, 30-32]等案例中都能有效运用在风力涡轮发电、剪切泵、古尔德轴承泵等大规模系统中.本文在此基础上考虑维修改善因子对大规模系统LCC优化影响,作出如下假设:

- 1) 系统由 $N(N \gg 2)$ 个同质单元组成,单元失效服从威布尔分布,且相互独立;
- 2) 按多单元联合模式开展维修工作,即系统内所有单元在固定的检测周期开展预防性维修工作;
- 3) 任一单元失效都会造成系统停机,若停机发生在检测周期之外,则产生停机惩罚成本;
- 4) 预防性维修的定期检测时间和更换时间,相对于系统运行时间可忽略不计;
- 5) 系统工作时间 T 用离散的工作次数表达,即 $T = 1, 2, \dots$;
- 6) 预防性维修周期 T_{PM} 是检验周期 D 的整数倍,即 $T_{PM} = k \times D, k = 1, 2, \dots$;
- 7) 所有单元的维修改善因子 ρ 相同,且 $\rho \in [0, 1]$.

1.2 单元及系统的失效率模型

针对上述文献对决策参数关系分析的不足,开展对系统预防性维修周期、单元可靠性及维修改善因子相互关系的研究.非完美维修对系统性能的改善一般通过失效率函数的更新来描述,失效率函数的更新来源于虚龄的改变和失效率函数整体趋势的改变两方面^[23].在Kijima的II型模型中,修复后虚拟年龄的减少量与修复前的虚拟年龄成比例,通常考虑用常数 ρ 表示修复效率,称为维修改善因子.

在系统运行阶段,设单元初始失效率为 λ_0 ,运行一段时间后修复前的瞬间失效率为 λ_1 ,单元修复后的瞬间失效率为 λ_2 ,其关系为 $\lambda_0 \leq \lambda_2 < \lambda_1$.当发生替换部件作业时 $\lambda_2 = \lambda_0$,单元失效率恢复成初始水平.如图1所示,假设预防性维修发生在 t_1 时刻,那么 ρ 代表的预防性维修效果可以表达为失效率 $\lambda(t_1)$ 回退成失效率 $\lambda[(1-\rho) \cdot t_1]$.

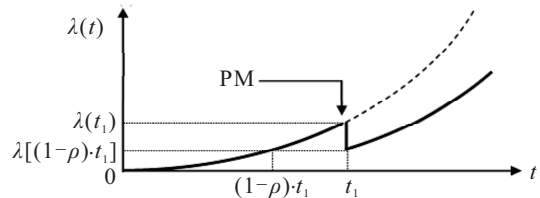


图1 预防性维修带来的单元失效率变化

当单元失效服从威布尔分布时,失效分布表达式为

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}, m > 1. \quad (1)$$

由威布尔分布的特性可知,当 $0 < m < 1$ 时,概率密度函数 $f(t)$ 随时间递减;当 $m = 1$ 时, $f(t)$ 随时间平稳下降,呈现指数分布失效的特点;当 $m > 1$ 时, $f(t)$ 出现峰值,呈现出损耗型失效的特点,此时运用非完美维修才有意义.由于本文考虑改善因子,设单元失效的形状参数 $m > 1$.

单元在 t_1 时刻发生预防性维修工作,维修之前的瞬时失效率为 $\lambda(t_1)$,维修之后的瞬时失效率为 $\lambda[(1-\rho) \cdot t_1]$,则一次预防性维修之后 t 时刻的瞬时失效率可表达为

$$\lambda_1(t) = \lambda(t - \rho \cdot t_1), t_1 \leq t \leq t_2. \quad (2)$$

若 $\rho = 0$,则表示单元修复如旧;若 $\rho = 1$,则表示单元修复如新,这两种情况本文不再讨论.

第 $i(i = 1, 2, \dots)$ 次预防性维修后, t 时刻单元失效率函数的一般形式为

$$\lambda_i(t) = \lambda\left(t - \rho \cdot \sum_{l=0}^{i-1} (1-\rho)^l t_{i-l}\right), t_i < t < t_{i+1}, \quad (3)$$

其中 t_{i-l} 为单元第 $(i-l)$ 次进行预防性维修的时间.

由假设6),将式(3)改进为

$$\lambda_i(t) = \lambda\left(t - \rho \cdot \sum_{l=0}^{i-1} (1-\rho)^l (i-l) \cdot T_{PM}\right), i \cdot T_{PM} \leq t \leq (i+1) \cdot T_{PM}. \quad (4)$$

关于同质大规模系统的失效演化的问题,Öner等^[23]针对多单元联合维修情形指出,当改善因子相同时,一个预防性维修周期内系统的失效率实际是该

时间段内单元失效率之和. 所以,当 N 个同质单元组成的大规模系统进行第 i 次预防性联合维修时,系统失效率 $\lambda_{S_i}(t)$ 定义如下:

$$\lambda_{S_i}(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t), \quad i \cdot T_{PM} \leq t \leq (i+1) \cdot T_{PM}. \quad (5)$$

1.3 系统可靠性影响因素

大规模系统一般会设定系统可靠性下限作为约束,将式(5)系统失效率模型代入可靠度评估公式中,设定系统可靠性下限的临界值为 R_0 ,表示系统在第 i 个预防性联合维修周期内可靠性必须不小于 R_0 ,可以得出系统可靠性约束函数为

$$\begin{aligned} R_i(T_{PM}) = & \exp \left[- \int_{i \cdot T_{PM}}^{(i+1) \cdot T_{PM}} \lambda_{S_i}(t) dt \right] = \\ & \exp \left(- N \cdot \int_{i \cdot T_{PM}}^{(i+1) \cdot T_{PM}} \lambda \left(t - \rho \cdot \sum_{l=0}^{i-1} (1-\rho)^l (i-l) \cdot T_{PM} \right) dt \right) = \\ & \exp \left(N \left(\frac{i \cdot T_{PM} - \rho \cdot \sum_{l=0}^{i-1} (1-\rho)^l (i-l) \cdot T_{PM}}{\eta} \right)^m - \right. \\ & \left. N \left(\frac{(i+1) \cdot T_{PM} - \rho \cdot \sum_{l=0}^{i-1} (1-\rho)^l (i-l) \cdot T_{PM}}{\eta} \right)^m \right) \geq R_0. \end{aligned} \quad (6)$$

非完美预防性联合维修关于改善因子的分析多在经济性层面,但还较少有文献分析预防性维修周期与单元可靠性,在改善因子影响下的相互关系.

1.4 系统设计成本模型 C_D

美国预算部将LCC定义为大型系统在预定运行时间内引起的直接、间接、一次性、重复性以及其它相关的成本,是研发、制造、使用、维修以及保障等一系列过程中产生的成本与估算必然产生的成本总和^[34]. 以下构建大规模系统LCC优化模型的思路是将LCC分为设计成本 C_D 、制造成本 C_M 和维修成本 $C_{W(sys)}$.

C_D 与 C_M 参考 Mettas^[35] 提出的设定,在设计阶段规定单元失效率的期望值,表示单元的平均寿命,其作用是作为中值表示单元可靠性设计和制造的难度. $C_{W(sys)}$ 计算系统单位时间产生的维修期望成本,该计算方式适用于固定成本高、能定期维护且维修时间可忽略不计的系统^[33].

期望的单元平均失效周期时间MTBF为

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right). \quad (7)$$

其中: $\Gamma(x)$ 为伽马函数, $\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{x-1} e^{-y} dy$.

设计成本是固定的基本成本 A_1 和研发成本 B_1 的总和. 一般而言,设计成本是关于产品可靠性的单调递增函数. 对于由同质单元组成系统的设计成本可由单个单元设计成本计算如下^[36]:

$$C_D = A_1 + B_1 \exp \left(\varphi \frac{h_{\max} - h}{h - h_{\min}} \right), \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}. \quad (8)$$

其中: $h = 1/MTBF = 1/[\eta \Gamma(1 + 1/m)]$, 表示单元失效率设计要求; $\exp \left(\varphi \frac{h_{\max} - h}{h - h_{\min}} \right)$ 为研发成本中提高单元可靠性的难度; h_{\max} 和 h_{\min} 分别为单元能被接受的可靠性最低设计要求和能达到的最高可靠性设计要求; A_1 为 h_{\max} 下的基本设计成本; B_1 为提高部件可靠性所需的设计成本增量; 常数 $\varphi (\varphi \in (0, 1))$ 为材料和资源约束下提高可靠性的难度系数. 在给定基本设计成本 A_1 的情况下, φ 和 B_1 越大,表示提高部件可靠性越难,花费的设计成本也越高.

1.5 系统制造成本模型 C_M

可靠性的提高将对设计工艺、材料选择、制造精度提出更高的要求,因此制造成本应该是关于产品可靠性的递增函数. 区别于设计成本,系统的制造成本应考虑系统内的单元数量,单元的制造成本包含固定成本 A_2 和由于制造难度产生的额外成本 B_2 . 设单个单元的制造成本为 C_m ^[37], 有

$$C_m = A_2 + B_2 \left(\frac{1}{h^v} - \frac{1}{h_{\max}^v} \right), \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, \quad (9)$$

其中 $\frac{1}{h^v} - \frac{1}{h_{\max}^v}$ 为单元制造的难度. 令 C_M 表示系统的制造成本,此时应考虑系统规模,建立下式:

$$C_M = N \cdot C_m = N \cdot \left[A_2 + B_2 \left(\frac{1}{h^v} - \frac{1}{h_{\max}^v} \right) \right], \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}. \quad (10)$$

其中: A_2 为 h_{\max} 下的基本制造成本, B_2 为提高单元可靠性需要增加的制造成本, $v (v \in (0, 1))$ 为提高单元可靠性的难度系数. 由模型可以看出,在给定 A_2 的条件下, N 、 B_2 和 v 越大,需要花费的制造成本越高.

1.6 系统维修成本模型 $C_{W(sys)}$

维修成本是LCC模型的重要组成部分,维修活动中非完美维修会导致单元经过多次维修后无法达到可靠性要求,最终会被替换并产生替换成本.

为确定大规模系统的最佳维修周期 T_{PM} , 首先定义 C_W 为单位时间内的单元平均维修成本, T_0 为单元两次替换之间时间期望, C_{W0} 为单元两次替换之间

维修总成本的期望^[23],那么存在

$$C_W = \frac{C_{W0}}{T_0}. \quad (11)$$

由于单元状态只能通过检测进行判断,故障则立即进行更换,那么单元两次替换之间的时间期望 T_0 可表示为

$$T_0 = D \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \cdot \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} f_{[l/k]}(t) dt. \quad (12)$$

其中: $\sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \cdot \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} f_{[l/k]}(t) dt$ 为两次更换之间的检测次数; $[l/k]$ 为不超过 l/k 的最大整数,表示第 l 次检测时系统经过了 $[l/k]$ 次预防性联合维修。

期望的维修成本包含: 替换成本 C_R 、检测成本 C_I 、预防性联合维修成本 C_{PM} 和停机惩罚成本 C_B , 那么单元两次替换之间维修总成本的期望 C_{W0} 为

$$C_{W0} = \sum_{l=0}^T \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} [C_I \cdot (l+1) + C_R + C_{PM} \cdot [l/k] + C_B] \cdot f_{[l/k]}(t) dt. \quad (13)$$

将式(12)和(13)分别代入(11),得到

$$C_W = \frac{\left(\sum_{l=0}^T \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} [C_I \cdot (l+1) + C_R + C_{PM} \cdot [l/k] + C_B] \cdot f_{[l/k]}(t) dt \right)}{\left(D \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \cdot \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} f_{[l/k]}(t) dt \right)}. \quad (14)$$

那么系统在 $[0, T]$ 维修成本模型可以表示为

$$C_{W(\text{sys})} = N \cdot T \cdot C_W = \frac{\left(N \cdot T \cdot \sum_{l=0}^T \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} [C_I \cdot (l+1) + C_R + C_{PM} \cdot [l/k] + C_B] \cdot f_{[l/k]}(t) dt \right)}{\left(D \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \cdot \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} f_{[l/k]}(t) dt \right)}. \quad (15)$$

2 系统全寿命周期成本模型

基于上述设计、制造和维修阶段的成本函数,可构建LCC函数,从而开展对大规模系统的最优预防性维修策略的优化分析。

由于系统在使用寿命周期内的可靠度不得低于设计要求,全寿命周期成本的优化需要在可靠性的约束下进行. 本文以系统LCC最小为目标函数,在系统可靠性约束下,建立基于系统失效状态的LCC优化模型

$$\min LCC = C_D + C_M + C_{W(\text{sys})} =$$

$$A_1 + B_1 \cdot \exp\left(\varphi \frac{h_{\max} - h}{h - h_{\min}}\right) + N \cdot \left[A_2 + B_2 \left(\frac{1}{h^v} - \frac{1}{h_{\max}^v} \right) \right] + \left(N \cdot T \cdot \sum_{l=0}^T \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} [C_I \cdot (l+1) + C_R + C_{PM} \cdot [l/k] + C_B] \cdot f_{[l/k]}(t) dt \right) / \left(D \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \cdot \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} f_{[l/k]}(t) dt \right), \quad (16)$$

s.t. $R_i(T_{PM}) =$

$$\exp\left[N \left(\left(\frac{T_{PM} + (i-1)(1-\rho)^i T_{PM}}{\eta} \right)^m - \left(\frac{(2 + (i-1)(1-\rho)^i) T_{PM}}{\eta} \right)^m \right) \right] \geq R_0, \\ h_{\min} < h < h_{\max}, k = 1, 2, \dots, \\ T = 1, 2, \dots, \eta \text{ 为正整数}. \quad (17)$$

模型优化的关键是确定 η 和 k , 使 $[0, T]$ 内的系统LCC最小. 约束条件确保了系统在预防性联合维修周期内的可靠度不小于设计要求的临界值 R_0 , 并给出 η 的取值范围. 文献[33]对大规模系统的LCC优化模型中的威布尔失效单元的尺度参数求二阶导数的结果大于0, 表明存在最优的尺度参数. 并且此优化模型中 k 、 η 均为整数, 属于整数约束的非线性优化问题. 其中, 工作时间 T 会很长, 且与 k 和 η 紧密相关, 导致优化过程计算量庞大. 若采用一般遍历算法则会耗时过长, 而遗传算法的自适应机制能极大提高计算效率。

利用遗传算法能够快速遍历全局解的优势, 编写算法程序. 通过设置种群数、迭代次数、变异概率和交叉概率等各项参数, 不断迭代直至最终收敛到最适应环境的个体, 能够快速求得问题的最优解或者满意解, 非常适合于大规模系统的优化问题. 模型中 N 的取值通常是成百上千, 且系统寿命长 ($T \rightarrow \infty$), 计算过程中 k 与 η 的组合优化数量庞大, 选择简单且易实现的“轮盘赌”方法能够解决可行解迭代是否达到要求的问题。

3 算例分析

以某大型装置的超高压气体开关系统为例, 验证上述构建的可靠性约束下系统全寿命周期成本模型的正确性和有效性. 该系统由108个同质单元组成, 每个单元可独立完成相应工作, 属于典型的大规模系统, 将面临组合规模指数增长导致的择优困难。

系统每工作一次, 单元就发生一次触发行为, 单元工作时间 T 是离散变量, 可记录为工作次数. 单元

的球形电极在每次触发时均有耗损,属于典型的退化型系统. 本算例采用定时截尾法,采集截止到2016年以前的多年历史运行数据,记录并统计系统工作27 000次期间的可靠性相关数据. 经过统计检验得出单元失效服从威布尔分布,利用最小二乘法拟合求得单元失效分布的形状参数 $m = 3.7$,尺度参数 $\eta = 2209$. 据此给出 $\eta \in [1000, 10000]$, $T \in (0, 40000]$.

根据以上设定及已有的工程参数,建立表2. 其中 $\rho = 0.7$,系统工程要求的最低临界值 $R_0 = 0.9$. 即在满足系统可靠性大于0.9的条件下,当维修改善程度为0.7时,寻找最优LCC时的 T_{PM} 和 η .

表2 气体开关系统相关参数

参数	数值	参数	数值
$A_1/\text{元}$	10000	N	108
$A_2/\text{元}$	4000	$T/\text{次}$	40000
$B_1/\text{元}$	12000	$D/\text{次}$	100
$B_2/\text{元}$	5000	$C_R/\text{元}$	200000
φ	0.02	$C_{PM}/\text{元}$	10000
v	0.7	$C_I/\text{元}$	1000
R_0	0.9	$C_B/\text{元}$	1000000
$\eta_{\max}/\text{次}$	10000	ρ	0.7
$\eta_{\min}/\text{次}$	1000	m	3.7

3.1 优化过程与结果

编写GA程序时,将 η 和 k 作为优化变量,设置种群数 = 10,迭代次数 = 50,变异概率 = 0.1,交叉概率 = 0.7,算例平均运行14s后输出最优染色体. 最终,得到最优染色体 ($\eta = 3800, k = 4$),对应的最优结果 ($LCC = 284.20 \times 10^6$). 这意味着单元的可靠性达到3800,预防性联合维修周期400次,使得系统LCC最优. 目前单元可靠性的现状值2209不能满足最优的要求,需要进行技术改进或采用新技术.

为使优化结果更有说服力,设置 X 轴为 η , Y 轴为 k , Z 轴为LCC,输出GA过程中遍历所有可行解的曲面图形,如图2所示. 图2中每个矩形网格对应一组可行解,每个可行解在相同 k 的情形下组合成系列解,

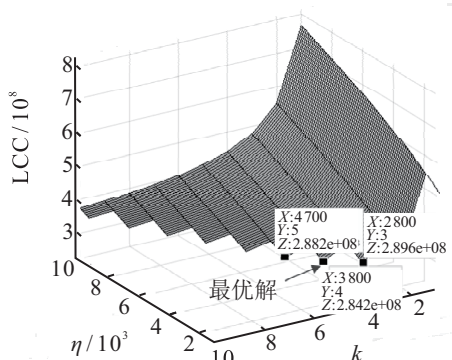


图2 LCC下优化结果三维图

由于 η 和 k 都是整型变量,每系列的局部最优解呈阶梯状分布,且表现出先递减后递增的趋势. 在所有局部最优解中,注释了全局最优解及近似点的坐标,由此表明上述算法及求解过程正确且有效.

3.2 LCC与维修成本的对比分析

为了对比维修成本视角与LCC视角对优化结果的不同影响,利用式(15)和(17)构建可靠性约束下系统维修成本优化模型

$$C_{W(\text{sys})} = N \cdot T \cdot C_W = \left(N \cdot T \cdot \sum_{l=0}^T \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} [C_I \cdot (l+1) + C_R + C_{PM} \cdot [l/k] + C_B] \cdot f_{[l/k]}(t) dt \right) / \left(D \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \cdot \int_{l \cdot D}^{(l+1) \cdot D} f_{[l/k]}(t) dt \right); \quad (18)$$

s.t. $R_i(T_{PM}) = \exp \left[N \left(\left(\frac{T_{PM} + (i-1)(1-\rho)^i T_{PM}}{\eta} \right)^m - \left(\frac{(2 + (i-1)(1-\rho)^i) T_{PM}}{\eta} \right)^m \right) \right] \geq R_0,$

$h_{\min} < h < h_{\max}, k = 1, 2, \dots,$

$T = 1, 2, \dots, \eta$ 为正整数. (19)

在仅考虑维修阶段的研究中,Öner等^[23]在算例中给出的维修成本优化的趋势图是先降低后趋于平稳,该趋势同样出现在李婧等^[13]的研究中. 采用相同算法求解维修视角优化模型,得到最优染色体 ($\eta = 8400, k = 9$),最优 ($C_{W(\text{sys})} = 100.60 \times 10^6$),其所有可行解的曲面图形如图3所示.

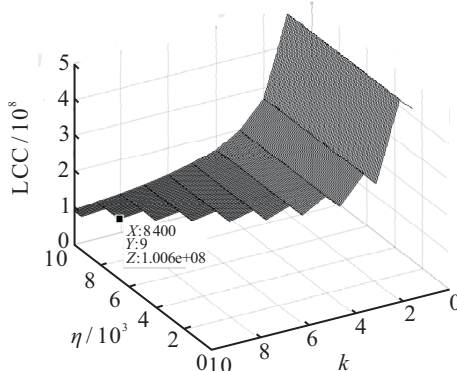


图3 仅考虑维修阶段成本优化结果

图3的变化趋势符合上述文献的结论,说明本文的模型同样适用于维修阶段视角的优化分析. 利用图3的最优染色体求解系统LCC,所得结果对比如表3所示. 显然,单独考虑维修成本的优化会对单元可靠性要求过高,使得系统的设计和制造成本显著上升,导致过高的LCC结果;而从系统LCC视角,会得

到合理的设计、制造和维修成本,实现系统LCC最优.所以,从全寿命过程的LCC视角去改善和优化系统维修策略优于单纯的维修成本视角.

表3 结果对比

类型	阶段	最优 η	最优 k	成本/元
LCC 视角	LCC	3800	4	284.20×10^6
	$C_{W(sys)}$			161.70×10^6
	$C_D + C_M$			122.59×10^6
仅维修视角	LCC	8400	9	342.80×10^6
	$C_{W(sys)}$			100.60×10^6
	$C_D + C_M$			242.20×10^6

3.3 维修改善因子 ρ 的影响分析

为了分析因子 ρ 对优化目标和约束条件的影响,依据图2的数据集作出更加深入地分析.

1) ρ 对系统可靠性的影响.

m 和 η 取拟合的实际值($m = 3.7, \eta = 2209$),式(7)和(9)表明此时设计成本和制造成本固定不变.那么在不同的维修改善因子条件下,系统可靠度 R 随 ρ 变化如表4所示($\rho < 0.7$ 时系统可靠度 R 低于要求,只展示 $\rho > 0.7$ 的结果).

表4 不同改善因子的系统可靠度结果对比

ρ	$T_{PM} = k \times D$	LCC/(10^6 元)	R
0.7	300	269.84	0.9082
0.8	300	269.91	0.9430
0.9	300	269.97	0.9627

由表4可见,当给定 m 和 η 的条件下,随着 ρ 增加,优化后的 k 保持不变,系统LCC相对稳定,系统可靠性随 ρ 的递增明显增加,这表明提高维修改善因子可以有效提高系统可靠性水平.

2) ρ 对LCC的影响.

基于上文的计算结果,固定单元的形状参数 $m = 3.7$ 不变,将 ρ 作为变量,检测周期倍数 k 与系统全寿命周期成本LCC在优化结果中的变化,如图4所示.图4中,系统LCC均随 k 的增加表现出先递减

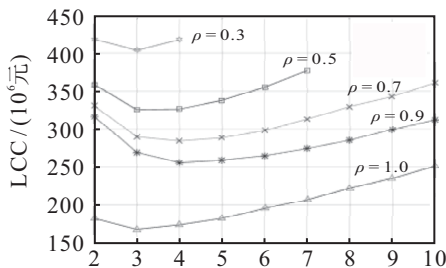


图4 ρ 对LCC的影响

后递增的趋势. k 相同时,LCC与 ρ 负相关.取图4中不同改善因子效果下的最优解,建立对比表5.在相同可靠度的要求下,随着 ρ 的递增,优化后的 k 缓慢增加, η 呈现下降的趋势.

表5 不同改善因子的系统LCC结果对比

ρ	$T_{PM} = k \times D$	η (shot)	LCC (10^6 元)
0.3	300	6600	403.8
0.5	300	4000	326.1
0.7	400	3800	284.2
0.9	400	2900	256.7

综上,在上述假设条件下,改善 ρ 导致优化后的 η 变小,带来LCC降低的好处;在 η 不变的条件下,改善 ρ 将会提升系统的可靠性,同时TPM和LCC变化趋势平稳.

通过上述分析可以看出,在优化过程中系统可靠性对 ρ 有最低要求,是影响LCC的关键参数.

3.4 优化参数的关系分析

采用相同的计算程序,补充 ρ 取0.3、0.5和0.9的情形,获得最优染色体结果通过 η/k 展示,如图5所示.可以发现,在相同 ρ 条件下优化参数比值呈现基本稳定的特征.

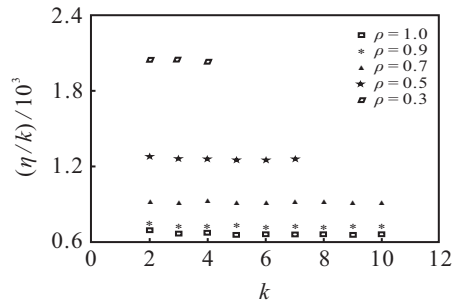


图5 可靠性要求为0.9时参数比值变化

同理,将系统可靠性要求值提高到0.95,优化结果如图6所示.对比分析图5和图6,系统可靠性要求值越高, η/k 越大,表明二者正相关;系统维修能力越高, η/k 越小,表明系统维修能力与预防性维修周期正相关.

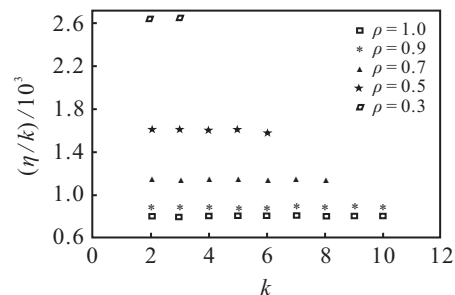


图6 可靠性要求为0.95时参数比值变化

综上, η/k 包含LCC优化的2个关键参数,表征单元经济性、可靠性和维修性的相互依赖关系,可用于指导系统全寿命过程中可靠性设计和维修策略的复杂决策问题。

4 结论

上述研究考虑非完美的多单元联合维修模式,构建可靠性约束下大规模系统全寿命周期成本优化模型,通过编写有效的遗传算法程序,找出预防性维修周期和单元可靠性的全局最优解。通过典型算例,验证模型和算法的有效性,重点分析改善因子对系统可靠性和LCC的影响,并探讨综合参数特征。具体结论如下:

1) 从全寿命过程的视角改善和优化系统维修策略优于单纯的维修成本视角;

2) 改善因子是影响LCC的关键参数,优化过程中系统可靠性水平对其有最低值的要求;

3) 优化参数比值在相同维修水平下基本稳定,若单元可靠性变化,可以按比值改变预防性维修周期,也能保证系统LCC最优。

上述研究成果可用于指导系统工程师在全寿命周期框架下,解决可靠性设计和维修策略的复杂决策问题,并将有助于简化其决策过程,在大规模系统可靠性工程优化研究方面具有一定理论和应用价值。

参考文献(References)

- [1] Mahmoud M S. Multilevel systems control and applications: A survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1977, 7(3): 125-143.
- [2] Ko Y M, Byon E. Reliability evaluation of large-scale systems with identical units[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(1): 420-434.
- [3] 陈光宇, 郑舒扬, 冯毅. 可靠性约束下系统全寿命周期成本优化建模[J]. 系统工程学报, 2015, 30(4): 442-450.
(Chen G Y, Zheng S Y, Feng Y. Optimization modeling of system lifecycle costs under reliability constraints[J]. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(4): 442-450.)
- [4] Yang L, Zhao Y, Ma X B. Group maintenance scheduling for two-component systems with failure interaction[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 71: 118-137.
- [5] Thomas L C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems[J]. Reliability Engineering, 1986, 16(4): 297-309.
- [6] Castanier B, Grall A, Bérenguer C. A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 87(1): 109-120.
- [7] Wang H Z. A survey of maintenance policies of deteriorating systems[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 139(3): 469-489.
- [8] Okoh P. Maintenance grouping optimization for the management of risk in offshore riser system[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98: 33-39.
- [9] Hameed Z, Vatn J. How to develop the grouping strategy for offshore wind turbines at the wind farm level[C]. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Hong Kong, 2012: 1919-1923.
- [10] Rokstad M M, Ugarelli R M. Minimising the total cost of renewal and risk of water infrastructure assets by grouping renewal interventions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 142: 148-160.
- [11] van Horenbeek A, Pintelon L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 120: 39-50.
- [12] Nguyen D T, Dijoux Y, Fouladirad M. Analytical properties of an imperfect repair model and application in preventive maintenance scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(2): 439-453.
- [13] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 考虑老化因素的串联系统不完全维修决策优化[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 827-833.
(Li Z Q, Xu T X, Gu J Y, et al. Optimal maintenance policies for series systems under imperfect repair considering aging factor[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 827-833.)
- [14] Zequeira R I, Bérenguer C. Periodic imperfect preventive maintenance with two categories of competing failure modes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(4): 460-468.
- [15] Huynh K T, Castro I T, Barros A, et al. Modeling age-based maintenance strategies with minimal repairs for systems subject to competing failure modes due to degradation and shocks[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 218(1): 140-151.
- [16] El-Ferik S. Economic production lot-sizing for an unreliable machine under imperfect age-based maintenance policy[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(1): 150-163.
- [17] Gilardoni G L, de Toledo M L G, Freitas M A, et al. Dynamics of an optimal maintenance policy for imperfect repair models[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(3): 1104-1112.
- [18] Yang L, Ye Z S, Lee C G, et al. A two-phase preventive maintenance policy considering imperfect repair and postponed replacement[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 274(3): 966-977.
- [19] Wu T Y, Ma X B, Yang L, et al. Proactive maintenance scheduling in consideration of imperfect repairs and production wait time[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53: 183-194.
- [20] Mullor R, Mulero J, Trottini M. A modelling approach to

- optimal imperfect maintenance of repairable equipment with multiple failure modes[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 24-31.
- [21] Park J H, Lee S C, Hong J W, et al. An optimal block preventive maintenance policy for a multi-unit system considering imperfect maintenance[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2009, 26(6): 831-847.
- [22] 王金贺, 张晓红, 曾建潮. 非完美维修模型下的风电机组最优维修决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(5): 1151-1160.
(Wang J H, Zhang X H, Zeng J C. Optimal maintenance decision for wind turbines based on imperfect maintenance model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(5): 1151-1160.)
- [23] Öner K B, Kiesmüller G P, van Houtum G J. Optimization of component reliability in the design phase of capital goods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(3): 615-624.
- [24] Tian Z G, Zuo M J. Redundancy allocation for multi-state systems using physical programming and genetic algorithms[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(9): 1049-1056.
- [25] Micheli L, Cao L, Laflamme S, et al. Life-cycle cost evaluation strategy for high-performance control systems under uncertainties[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(2): 04019134.
- [26] Tian Z G, Levitin G, Zuo M J. A joint reliability-redundancy optimization approach for multi-state series-parallel systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(10): 1568-1576.
- [27] Zhao X J, Fouladirad M, Bérenguer C, et al. Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(8): 921-934.
- [28] Levitin G, Lisnianski A. A new approach to solving problems of multi-state system reliability optimization[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2001, 17(2): 93-104.
- [29] Coit D W, Smith A E. Genetic algorithm to maximize a lower-bound for system time-to-failure with uncertain component Weibull parameters[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2002, 41(4): 423-440.
- [30] Tian Z G, Liao H T. Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(5): 581-589.
- [31] 李婧, 陈光宇, 唐菱, 等. 双层多态加权 k/n 系统可用性模型与冗余设计优化[J]. *控制与决策*, 2020, 35(11): 2752-2760.
(Li J, Chen G Y, Tang L, et al. Availability modeling and redundancy design optimization of dual hierarchical multi-state weighted k -out-of- n system[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(11): 2752-2760.)
- [32] Ko Y M, Byon E. Condition-based joint maintenance optimization for a large-scale system with homogeneous units[J]. *IIE Transactions*, 2017, 49(5): 493-504.
- [33] 陈光宇, 张文, 张小民. 威布尔分布下系统全寿命周期成本建模与决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(11): 2933-2940.
(Chen G Y, Zhang W, Zhang X M. Modeling and decision-making of system lifecycle costs under Weibull distribution[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(11): 2933-2940.)
- [34] Blanchard B S. Design and manage to life cycle cost[J]. *Barringer & Associates*, DOI: 10.1021/cen-v067n034.p027.
- [35] Mettas A. Reliability allocation and optimization for complex systems[C]. *International Symposium on Product Quality and Integrity*. Los Angeles, 2000: 216-221.
- [36] Jin T, Wang P. Planning performance based contracts considering reliability and uncertain system usage[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2012, 63(10): 1467-1478.
- [37] Cherkaoui H, Huynh K T, Grall A. Quantitative assessments of performance and robustness of maintenance policies for stochastically deteriorating production systems[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(3): 1089-1108.

作者简介

王瑞琦(1988—), 女, 博士生, 从事系统可靠性分析与成本优化的研究, E-mail: ricky4018038@126.com;

陈光宇(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事质量管理与系统可靠性工程等研究, E-mail: chenguangyu@uestc.edu.cn;

梁娜(1996—), 女, 硕士生, 从事质量管理与成本优化的研究, E-mail: 915481020@qq.com;

吴杰(1995—), 男, 硕士生, 从事系统可靠性分析与成本优化的研究, E-mail: wujie.hx@chinaccs.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)