



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION

冷/温混合贮备系统最优切换及视情维修决策

张晓红, 陶倩倩, 杨天祥, 何于港, 甘婕

引用本文:

张晓红, 陶倩倩, 杨天祥, 何于港, 甘婕. 冷/温混合贮备系统最优切换及视情维修决策[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2069–2078.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1547>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

基于模型依赖驻留时间的异步切换控制

Asynchronous switching control based on mode-dependent average dwell time

控制与决策. 2021, 36(3): 609–618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0645>

基于反馈无源化的切换非线性系统 H_∞ 跟踪控制

Passification-based H_∞ tracking control for a class of switched nonlinear systems

控制与决策. 2021, 36(11): 2729–2734 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0798>

冷/温混合贮备系统最优切换及视情维修决策

张晓红^{1,2†}, 陶倩倩², 杨天祥², 何于港², 甘 婕^{1,2}

(1. 太原科技大学 工业与系统工程研究所, 太原 030024; 2. 太原科技大学 经济与管理学院, 太原 030024)

摘要: 针对周期性切换冷/温混合贮备系统, 研究其最优切换以及视情维修决策, 在系统劣化建模的基础上, 分析系统结构和切换式运行维修特性, 制定基于周期切换和检测的离线视情维修策略. 首先, 通过分析系统运行与备用设备交替使用、维修过程中的状态转移特性, 推导各检测周期时刻系统状态概率分布模型以及各维修活动的概率; 然后, 以系统有限时间范围内平均费用率最小为目标建立解析优化模型, 以决策最优切换周期和维护阈值, 并采用遗传算法对模型进行求解; 最后, 以汽轮发电机定子冷却水泵系统为对象验证策略和模型的正确性和有效性, 并对参数进行灵敏度分析. 实验结果表明, 所提出离线视情维修策略能够有效地降低系统的维修成本.

关键词: 贮备系统; 最优切换; 视情维修; 冷/温混合贮备; 最优决策

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1547

引用格式: 张晓红, 陶倩倩, 杨天祥, 等. 冷/温混合贮备系统最优切换及视情维修决策[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2069-2078.

Optimal switching and condition-based maintenance decision of cold/warm mixed standby system

ZHANG Xiao-hong^{1,2†}, TAO Qian-qian², YANG Tian-xiang², HE Yu-gang², GAN Jie^{1,2}

(1. Division of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Economics and Management, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The optimal switching and condition-based maintenance decision of the cold/warm mixed standby system with periodic switching are studied. The system structure and switching operation and maintenance characteristics are analysed on the basis of system degradation modelling, and the off-line condition-based maintenance strategy with periodic switching and detection is formulated. Firstly, by analyzing the state transition characteristics of the system in the process of alternate use and maintenance of active and standby equipment, the model of probability distribution of the system state and the probability of each maintenance activity are derived. Then, an analytical optimization model is established to minimize the average cost rate in the finite time horizon, and the optimal switching period and maintenance threshold are determined. The model is solved using the genetic algorithm. Finally, the correctness and effectiveness of the strategy and model are verified by taking the stator cooling water pump system of a turbogenerator as an example, and the sensitivity analysis of the parameters is carried out. The results show that the proposed off-line condition-based maintenance strategy can effectively reduce the maintenance cost of the system.

Keywords: standby system; optimal switching; condition-based maintenance; cold/warm mixed standby system; optimal decision

0 引言

在工业应用中, 为了保证系统连续可靠运行, 如汽轮发电机定子冷却水泵系统等通常采用一用一备贮备冗余结构, 两台设备进行周期切换运行^[1]. 由于水泵系统故障率较高, 维修时间较长, 通常还需离线

贮备 1 台备用泵以备紧急替换用. 一般而言, 运行泵会因载荷较强而发生快速劣化; 贮备泵置于与运行泵相同工作环境中, 性能也会有所劣化, 但是相较于运行泵退化较慢^[2]; 在库的备用泵通常具有特殊贮备条件, 性能保持不变. 如水泵的电机绕组绝缘在运行

收稿日期: 2022-08-31; 录用日期: 2023-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071183, 71701140); 山西省基础研究计划项目(20210302124680); 太原科技大学科研启动基金项目(20202028); 山西省回国留学人员科研项目(2022-161).

责任编辑: 刘民.

†通讯作者. E-mail: zhangxh@tyust.edu.cn.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

过程中因交变电磁场作用,发生振动、破裂、发热等导致绝缘老化;贮备期间的绕组绝缘也会因受潮使其电气强度下降.从结构和性能退化角度,此类系统中的3台设备共同构成了一个冷/温混合贮备系统^[3].

科学合理的切换周期是保证系统经济安全运行的重要因素^[4].过长的切换周期,会因运行设备严重劣化而带来安全隐患,备用设备也会因长期未使用而发生无效的性能劣化.过短的切换周期,又会因频繁的切换增加系统运行干扰和切换成本^[5].此外,对于切换下来的缺陷设备也应根据其实际劣化程度,给予更加合理的保养和维护活动,以保证后续的运行性能^[6].库存备用设备的存在,虽然从一定程度上改善和提高了系统运行可靠性,但是,也为系统最优切换和维修决策建模引入了新的复杂性^[7].因此,基于系统运行统计特性,决策一个合理有效的切换和维护策略是冷/温混合贮备系统经济可靠运行的有效手段^[8].

贮备系统维修决策的研究得到了专家学者们的极大关注.针对冷贮备系统,Behboudi等^[9]构建了不完全切换下的系统可靠性模型;Mendes等^[4]优化了冷贮备系统的定期检查间隔;王孟雅等^[10]构建了维修策略和备件库存联合优化模型;杨天枢等^[11]构建了拟周期冷贮备系统预防性维修优化模型.针对温贮备系统,Shen等^[12]制定了定期切换与基于年龄的维修相结合的维修策略;尹东亮等^[13]引入多维修台异步多重休假策略建立了可靠性模型;Bai等^[14]通过最大化系统平均失效时间确定了最优切换间隔.

针对混合贮备系统,Ardakan等^[3]提出了将主动冗余与冷贮备相结合的混合系统冗余策略;金海波等^[15]研究了如何选择“用一备二”双贮备系统模型,使得系统性能最优或经济效益最大;Golmohammadi等^[16]针对由主动冗余和冷贮备组成的系统,提出了定期检查与预防性维修相结合的策略;Temraz^[17]分析了预防性维修对提高冷温混合贮备系统性能的作用;Gao等^[18]计算了混合备用系统的可靠性函数和平均失效时间;Liu等^[19]针对具有混合备用部件的 K/N 再审系统进行了建模.

以上针对贮备系统的研究大多关注系统的最佳设计、可靠性分析,维修决策研究也多集中于在传统可靠度评估基础上进行基于时间的维修决策(TBM).近年来随着传感技术的不断发展,基于状态的维修(CBM)因其根据设备实际工作状态安排维修,能够有效降低系统停机故障风险和维修成本而成为了新的研究热点^[20].目前,已有专家将CBM策略引入贮备系统的维修决策中,张晓红等^[21]制定了冷贮

备系统切换式离线视情维护策略;Wang等^[22]针对冷贮备系统制定了定期检测和预防性维护的策略;Ma等^[23]提出了温贮备系统机会维修与视情维修相结合的维修策略;Jiang等^[6]针对非瞬时切换下温贮备系统,提出了基于状态的切换和替换的维修策略.

冷/温混合贮备系统的维修决策存在其特殊性.从结构上,冷/温混合贮备模式下,温贮备设备的退化加快了系统切换和维修需求,冷贮备设备的存在则延缓了系统切换和维修需求.从策略上,可以检测到系统状态来反映系统退化性能,因此,可采用基于状态的切换和维修决策建模方法.从模型上,由于设备的状态转移包括运行设备、温贮备设备、冷贮备设备的组合状态转移,且3个设备状态间存在相关性,因此,系统整体可靠性取决于3个设备的性能退化以及相应的状态转移特性,需对系统整体维修需求进行分析,构建维修干预下的系统状态转移概率模型,作为系统维修决策建模依据.

本文针对状态可检测的周期性切换冷/温混合贮备系统,制定基于周期切换和检测的离线视情维修策略;在此基础上,推导冷/温混合贮备的状态转移概率模型;以系统平均费用率最小为目标,建立解析优化模型,以决策最优的切换周期和维修阈值,并采用遗传算法对模型进行求解;最后,以汽轮发电机定子冷却水泵系统为例进行实验分析.

1 系统描述

1.1 系统结构定义

本文针对的是一个由1台运行设备和1台温贮备的同型设备组成的一用一备在线运行温贮备系统,和另一台同型的离线冷贮备设备共同构成的冷/温混合贮备系统,系统结构如图1所示.

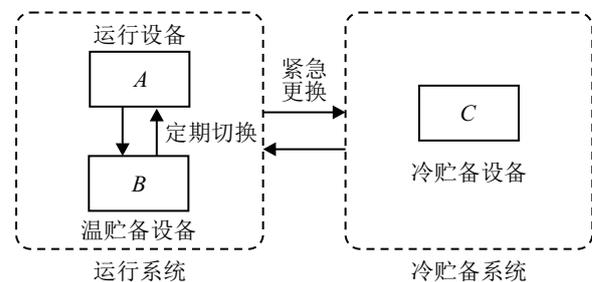


图1 系统结构示意图

1.2 系统退化建模

受生产和运行环境的影响,运行设备和温贮备设备退化过程均呈现随机特性,形成一个随机过程.但是由于载荷不同,退化特性不同.设运行设备退化过程为 $X_A(t)_{t \geq 0}$,温贮备设备退化过程为 $X_B(t)_{t \geq 0}$.本文以Gamma过程为例进行建模分析,Gamma更适合

描述汽轮发电机定子冷却水泵等具有不可逆的累积损伤物理过程,如蠕变、疲劳、腐蚀、磨损等^[24],且具有良好的数学解析特性。

由于不同设备在不同时刻可能在运行、温贮备和冷贮备3种状态间进行切换,用A、B、C分别表示处于运行状态、温贮备状态、冷贮备状态的设备。用随机变量 x_i^t 表示设备 $i(i \in \{A, B, C\})$ 在任意 t 时刻的退化水平。系统初始运行时刻 $t=0, x_A^0 = x_B^0 = x_C^0 = 0$ 。设运行设备单位时间内的退化增量为 Δx_A 服从概率密度为 $f_{X_A}(x)$ 的Gamma分布,温贮备设备单位时间内的退化增量 Δx_B 服从概率密度为 $f_{X_B}(x)$ 的Gamma分布,冷贮备设备在贮备期内不发生退化。

1.3 周期切换式离线视情维修策略

对于上述所定义的系统采用周期切换式离线视情维修策略。为了保证系统的可靠性,每隔时间 T 对运行设备和温贮备设备进行切换。任意第 k 个切换周期,系统切换和维修工作分为如下3步进行。

1) 温贮备设备预检测:在第 k 次切换前 τ 时间,即 $kT - \tau$ 时刻,对温贮备设备状态 $x_B^{kT-\tau}$ 进行预检测,预检测成本为 C_{ins} ,定义 D_p^2 为温贮备设备预检测后的预防维修阈值:

①若 $0 \leq x_B^{kT-\tau} < D_p^2$,则设备状态良好,可保证下一周期高效运行,无需进行维修,继续温贮备。

②若 $x_B^{kT-\tau} \geq D_p^2$,则设备性能较差,无法保证下一周期正常运行,考虑到维修很难在时间 τ 内完成,因此,将其与冷贮备设备更换,记作PR,更换成本为 C_{pr} ,时间忽略不计,更换不影响设备状态。同时对换下来的温贮备设备进行预防性维修,记作PM₂,维修成本为 C_p^2 ,时间为 T_p^2 ,考虑到预防性维修较易,修复时间短,因此,假设 $T_p^2 \leq T$ 。维修后恢复如新,并保持冷贮备状态。

2) 运行系统周期切换:在 kT 时刻对运行和温贮备设备进行切换。由于切换时间较短,可忽略,切换成本为 C_s ,切换过程完美,不改变设备状态。

3) 缺陷设备的检测:在 kT 时刻完成切换后,检测切换下来的设备状态,检测成本为 C_{ins} 。检测到的状态为上一周期运行设备结束运行时的状态 x_A^{kT} ,定义 D_f 为设备故障阈值, D_p^1 为周期检测后的预防维修阈值,具体维修策略如下:

①若 $0 \leq x_A^{kT} < D_p^1$,则进行保养,记作MM,设保养成本为 C_m ,时间为 T_m ,保养不改变设备状态。保养时间一般较短,故假设 $T_m < T - \tau$,保养后设备直接进入温贮备状态。

②若 $D_p^1 \leq x_A^{kT} < D_f$,则进行预防性维修,记作PM₁,设维修成本为 C_p^1 ,时间为 T_p^1 ,维修后恢复如新。

设备退化不严重,较易恢复,因此,维修时间一般不超过 $T - \tau$,即满足 $T_m < T_p^1 < T - \tau$,预防维修后设备直接进入温贮备状态。

③若 $x_A^{kT} \geq D_f$,则进行故障后维修,记作FM,维修成本为 C_f ,时间为 T_f 。通常故障损伤较严重,修复难度较大,因此,无法保证在 $T - \tau$ 时间内完成。若 $T_f < T - \tau$,则设备在完成维修后立即进入温贮备状态;若 $T_f > T - \tau$,则为了保证定期切换的顺利进行,在下次温贮备设备预检测时先用冷贮备设备替换温贮备设备,该活动同1)中PR。更换后继续对缺陷设备进行维修。本文假设 $T_f < 2T - \tau$,维修或订购后的设备状态全新。本文暂未考虑备用设备的订购问题,因此,假设冷贮备设备在需要时一定可用。

2 维修决策

一个生产系统的运维目标是尽可能地降低运维成本,本文以系统有限时间范围内的平均费用率最小为目标,建立冷/温混合贮备系统的最优决策模型,以确定系统最优的切换周期 T 、预检测提前期 τ 、温贮备设备预防维修阈值 D_p^2 、运行设备预防性维修阈值 D_p^1 。以 n 个运行周期 nT 为建模的时间范围进行建模。决策模型如下式所示:

$$\min CR = \min \frac{E[C_{nT}]}{nT} = \min_{(T, \tau, D_p^1, D_p^2)} \frac{E[C(T, \tau, D_p^1, D_p^2)]}{nT};$$

$$\text{s.t. } T = 1, 2, \dots, 0 < D_p^2 < D_p^1 < D_f. \quad (1)$$

其中:CR为维修费用率, $E[C_{nT}] = E[C(T, \tau, D_p^1, D_p^2)]$ 为 n 个周期的期望总成本。

2.1 期望总成本 $E[C_{nT}]$ 的计算

对于任意第 k 个周期,可能产生的成本有:预检测时发生的检测 C_{ins} 、预检测后的更换和维修成本 C_P 、周期切换成本 C_s 、切换后的检测成本 C_{ins} 、维修成本 C_W ,其中 C_{ins} 和 C_s 为每个周期固定产生的成本。

系统在第 k 次周期切换前预检测时,运行设备A,此时处于运行退化状态;温贮备设备B可能是因上一周期切换后经保养、预防性维修或故障后维修后进入温贮备状态,也可能是故障后维修未结束的状态;冷贮备设备C一直处于冷贮备。因此,若设备B已维修完成处于温贮备状态,当设备状态 $x_B^{kT-\tau} \geq D_p^2$ 时,系统以概率 $P_{PM_2}^k = P(x_B^{kT-\tau} \geq D_p^2)$ 产生预检测更换和预防性维修成本 $C_{pr} + C_p^2$;若设备B处于故障后维修未完成的状态时,将会产生更换成本 C_{pr} ,但是,该成本的产生是以上一周进行故障后维修为条件的,因此,计入周期开始时切换后的故障后维修成本

中. 该部分期望成本为

$$E(C_P) = (C_{pr} + C_p^2)P_{PM_2}^k. \quad (2)$$

在第 k 次周期切换时, 切换下来的设备维修概率取决于周期开始时刻运行设备 A 的状态 x_A^{kT} . 系统以概率 $P_{MM}^k = P(0 \leq x_A^{kT} < D_p^1)$ 产生保养成本 C_m , 以概率 $P_{PM_1}^k = P(D_p^1 \leq x_A^{kT} < D_f)$ 产生预防性维修成本 C_p^1 , 以概率 $P_{FM}^k = P(x_A^{kT} \geq D_f)$ 产生故障后维修成本 C_f , 此时, 以概率 P_{pr}^k 产生更换成本 C_{pr} . 换下来的运行设备的期望维修成本为

$$E(C_W) = C_m P_{MM}^k + C_p^1 P_{PM_1}^k + (C_f + C_{pr} P_{PR}^k) P_{FM}^k. \quad (3)$$

故, n 个周期的期望总成本为

$$E[C_{nT}] = \sum_{k=1}^n [2C_{ins} + E(C_P) + C_s + E(C_W)]. \quad (4)$$

2.2 系统维修概率计算

设任意第 k 个切换时刻运行设备 A 和温贮备设备 B 的状态概率密度函数分别为 $\Omega_{A,k}(x)$ 和 $\Omega_{B,k}(x)$, 第 k 个预检测时刻温贮备设备 B 的状态概率密度函数为 $\Omega_{B,k'}(x)$. 任意第 k 个周期内, 进行预检测后温贮备设备进行预防性更换的概率为 $P_{PM_2}^k = \int_{D_p^2}^{\infty} \Omega_{B,k'}(x) dx$. 任意第 k 个周期末, 换下来的运行设备进行保养的概率为 $P_{MM}^k = \int_0^{D_p^1} \Omega_{A,k}(x) dx$, 进行预防性维修的概率为 $P_{PM_1}^k = \int_{D_p^1}^{D_f} \Omega_{A,k}(x) dx$, 运行设备进行故障后维修的概率为 $P_{FM}^k = \int_{D_f}^{\infty} \Omega_{A,k}(x) dx$, 故障后维修时间大于 $T - \tau$ 的概率为 $P_{PR}^k = \int_{T-\tau}^{2T-\tau} f_{T_f}(t) dt$.

3 系统状态概率模型

系统的失效和累积退化由 3 个设备的退化特性共同决定, 且受到维修活动的影响. 按照状态转移的先后次序, 先求解第 k 个预检测时刻温贮备设备 B 的状态概率密度 $\Omega_{B,k'}(x)$, 然后在此基础上分别求解第 k 个切换时运行设备 A 和温贮备设备 B 的状态概率密度 $\Omega_{A,k}(x)$ 和 $\Omega_{B,k}(x)$.

任意第 k ($k > 1$) 个切换周期中, 用 x_A^{kT-}/x_B^{kT-} 和 x_A^{kT+}/x_B^{kT+} 分别表示第 k ($k > 1$) 个周期检测时刻运行设备 A /温贮备设备 B 切换前和切换后的状态, $x_B^{kT'+}$ 为温贮备设备在第 k ($k > 1$) 个周期维修后的状态, $x_B^{(kT-\tau)-}$ 和 $x_B^{(kT-\tau)+}$ 为第 k ($k > 1$) 个周期预检测前后温贮备设备的状态.

在离线视情维修策略下, 第 $k-1$ 次周期切换时, 系统中的运行设备和温贮备设备的状态发生了互换, 即切换后所检测到的温贮备设备 $x_B^{(k-1)T+}$ 的状态为

前一周运行设备的状态 $x_A^{(k-1)T-}$.

1) 若 $0 \leq x_B^{(k-1)T+} < D_p^1$, 则保养后进入温贮备状态. 保养活动不改变设备状态, 因此, 执行该活动后的状态 $x_B^{(k-1)T'+} = x_B^{(k-1)T+} = x_A^{(k-1)T-}$. 设备在温贮备 $T - \tau - T_m$ 时长后到达预检测时刻, 贮备期内由 $x_B^{(k-1)T'+}$ 退化至 $x_B^{(kT-\tau)-}$ 的概率为

$$\Omega_{B,k'}^1(x_B^{(kT-\tau)-}) = \int_0^{\min(x_B^{(kT-\tau)-}, D_p^1)} \Omega_{A,k-1}(x_A^{(k-1)T-}) f_{X_B}^{(T-\tau-T_m)} \times (x_B^{(kT-\tau)-} - x_A^{(k-1)T-}) dx_A^{(k-1)T-}. \quad (5)$$

2) 若 $D_p^1 \leq x_B^{(k-1)T+} < D_f$, 则预防性维修后进入温贮备状态. 维修后设备恢复如新, 即 $x_B^{(k-1)T'+} = 0$. 设备在温贮备 $T - \tau - T_p^1$ 时长后到达预检测时刻, 贮备期退化由 0 至 $x_B^{(kT-\tau)-}$ 的概率为

$$\Omega_{B,k'}^2(x_B^{(kT-\tau)-}) = \int_{D_p^1}^{D_f} \Omega_{A,k-1}(x_A^{(k-1)T-}) f_{X_B}^{(T-\tau-T_p^1)} \times (x_B^{(kT-\tau)-}) dx_A^{(k-1)T-}. \quad (6)$$

3) 若 $x_B^{(k-1)T+} \geq D_f$, 则进行故障后维修, 此时还需分以下两种情况:

① 维修在 $T - \tau$ 前完成. 故障后维修后进入温贮备状态. 维修后设备恢复如新, 因此 $x_B^{(k-1)T'+} = 0$. 由于 T_f 的随机性, 设备在温贮备 $T - \tau - T_f$ 时长后到达预检测时刻, 贮备期内其状态由 0 退化至 $x_B^{(kT-\tau)-}$ 的概率为

$$\Omega_{B,k'}^{3-1}(x_B^{(kT-\tau)-}) = \int_{D_f}^{\infty} \Omega_{A,k-1}(x_A^{(k-1)T-}) dx_A^{(k-1)T-} \int_0^{T-\tau} f_{T_f}(t) \times f_{X_B}^{(T-\tau-t)}(x_B^{(kT-\tau)-}) dt. \quad (7)$$

② 维修在 $T - \tau$ 前尚未完成. 此时, 需将冷贮备设备与温贮备设备进行切换. 切换后温贮备设备状态为 0, 该情况发生的概率为 $\Pr(T_f > T - \tau) = \int_{T-\tau}^{2T-\tau} f_{T_f}(t) dt$, 即

$$\Omega_{B,k'}^{3-2}(x_B^{(kT-\tau)-} = 0) = \int_{D_f}^{\infty} \Omega_{A,k-1}(x_A^{(k-1)T-}) dx_A^{(k-1)T-} \int_{T-\tau}^{2T-\tau} f_{T_f}(t) dt. \quad (8)$$

综上, 第 k ($k > 1$) 个周期预检测时刻, 温贮备设备状态为 $x_B^{(kT-\tau)-}$ 的概率密度函数可表示为

$$\Omega_{B,k'}(x_B^{(kT-\tau)-}) = \begin{cases} \Omega_{B,k'}^1(x_B^{(kT-\tau)-}) + \Omega_{B,k'}^2(x_B^{(kT-\tau)-}) + \Omega_{B,k'}^{3-1}(x_B^{(kT-\tau)-}), & x_B^{(kT-\tau)-} \geq 0; \\ \Omega_{B,k'}(x_B^{(kT-\tau)-}) + \Omega_{B,k'}^{3-2}(x_B^{(kT-\tau)-} = 0), & x_B^{(kT-\tau)-} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

温贮备设备在进行第 k 次预检测后,检测到的贮备设备状态和维修活动有如下两种.

1) 若预检测前设备维修活动已完成,且 $0 \leq x_B^{(kT-\tau)^-} < D_p^2$, 则预检测时无需进行 PR, 预检测后设备状态 $x_B^{(kT-\tau)^+} = x_B^{(kT-\tau)^-}$. 设备继续温贮备 τ 个时间单位后由 $x_B^{(kT-\tau)^-}$ 退化至 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率为 $f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-} - x_B^{(kT-\tau)^-})$.

2) 若预检测前设备维修活动已完成,且 $x_B^{(kT-\tau)^-} \geq D_p^2$, 或预检测前维修活动尚未完成,则预检测时需进行 PR, 切换后的温贮备设备状态恢复为 $x_B^{(kT-\tau)^+} = 0$, 设备继续温贮备 τ 个时间单位后由 0 退化至 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率为 $f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-})$.

综合以上温贮备设备的状态和维修情况,可组合得到以下 7 种情况.

情况 1-1: 第 $k-1$ 次周期切换后 $0 \leq x_B^{(k-1)T^+} < D_p^1$, 第 k 次预检测后 $0 \leq x_B^{(kT-\tau)^-} < D_p^2$, 系统在第 k 次切换前温贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率如下式所示:

$$\Omega_{B,k}^{1-1}(x_B^{(kT)^-}) = \int_0^{\min(x_B^{(kT)^-}, D_p^2)} \Omega_{B,k'}^1(x_B^{(kT-\tau)^-}) f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-} - x_B^{(kT-\tau)^-}) dx_B^{(kT-\tau)^-}. \quad (10)$$

情况 1-2: 第 $k-1$ 次周期切换后 $0 \leq x_B^{(k-1)T^+} < D_p^1$, 第 k 次预检测后 $x_B^{(kT-\tau)^-} \geq D_p^2$, 第 k 次切换前温贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率如下式所示:

$$\Omega_{B,k}^{1-2}(x_B^{(kT)^-}) = f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-}) \int_{D_p^2}^{\infty} \Omega_{B,k'}^1(x_B^{(kT-\tau)^-}) dx_B^{(kT-\tau)^-}. \quad (11)$$

情况 2-1: 第 $k-1$ 次周期切换后 $D_p^1 \leq x_B^{(k-1)T^+} < D_f$, 第 k 次预检测后 $0 \leq x_B^{(kT-\tau)^-} < D_p^2$, 第 k 次切换前温贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率如下式所示:

$$\Omega_{B,k}^{2-1}(x_B^{(kT)^-}) = \int_0^{\min(x_B^{(kT)^-}, D_p^2)} \Omega_{B,k'}^2(x_B^{(kT-\tau)^-}) \times f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-} - x_B^{(kT-\tau)^-}) dx_B^{(kT-\tau)^-}. \quad (12)$$

情况 2-2: 第 $k-1$ 次周期切换后 $D_p^1 \leq x_B^{(k-1)T^+} < D_f$, 第 k 次预检测后 $x_B^{(kT-\tau)^-} \geq D_p^2$, 第 k 次切换前温贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率如下式所示:

$$\Omega_{B,k}^{2-2}(x_B^{(kT)^-}) = f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-}) \int_{D_p^2}^{\infty} \Omega_{B,k'}^2(x_B^{(kT-\tau)^-}) dx_B^{(kT-\tau)^-}. \quad (13)$$

情况 3-1-1: 第 $k-1$ 次周期切换后 $x_B^{(k-1)T^+} \geq D_f$, 第 k 次预检测后的 $0 \leq x_B^{(kT-\tau)^-} < D_p^2$, 第 k 次切换前温贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率如下式所示:

$$\Omega_{B,k}^{3-1-1}(x_B^{(kT)^-}) =$$

$$\int_0^{\min(x_B^{(kT)^-}, D_p^2)} \Omega_{B,k'}^{3-1}(x_B^{(kT-\tau)^-}) \times f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-} - x_B^{(kT-\tau)^-}) dx_B^{(kT-\tau)^-}. \quad (14)$$

情况 3-1-2: 第 $k-1$ 次周期切换后 $x_B^{(k-1)T^+} \geq D_f$, 第 k 次预检测后状态满足 $x_B^{(kT-\tau)^-} \geq D_p^2$, 第 k 次切换前温贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率如下式所示:

$$\Omega_{B,k}^{3-1-2}(x_B^{(kT)^-}) = f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-}) \int_{D_p^2}^{\infty} \Omega_{B,k'}^{3-1}(x_B^{(kT-\tau)^-}) dx_B^{(kT-\tau)^-}. \quad (15)$$

情况 3-2: 第 $k-1$ 次周期切换后 $x_B^{(k-1)T^+} \geq D_f$, 且第 k 次预检测前设备维修活动尚未完成, 系统在第 k 次切换前贮备设备状态为 $x_B^{(kT)^-}$ 的概率为

$$\Omega_{B,k}^{3-2}(x_B^{(kT)^-}) = \Omega_{B,k'}^{3-2}(x_B^{(kT-\tau)^-} = 0) f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(kT)^-}). \quad (16)$$

总之, 第 $k-1$ 个周期结束时温贮备设备状态为 $X_B^{(kT)^-}$ 的概率密度函数可表示如下:

$$\Omega_{B,k}(x_B^{(kT)^-}) = \Omega_{B,k}^{1-1}(x_B^{(kT)^-}) + \Omega_{B,k}^{1-2}(x_B^{(kT)^-}) + \Omega_{B,k}^{2-1}(x_B^{(kT)^-} t) + \Omega_{B,k}^{2-2}(x_B^{(kT)^-}) + \Omega_{B,k}^{3-1-1}(x_B^{(kT)^-}) + \Omega_{B,k}^{3-1-2}(x_B^{(kT)^-}) + \Omega_{B,k}^{3-2}(x_B^{(kT)^-}). \quad (17)$$

在第 $k-1$ 次切换后运行设备状态即为换上来的温贮备设备状态, 因此, 有 $x_A^{(k-1)T^+} = x_B^{(k-1)T^-}$, 设备在运行时间 T 时长后到达第 k 次切换时刻, 故第 k 次周期切换前运行设备状态为 $x_A^{(kT)^-}$ 的概率为

$$\Omega_{A,k}(x_A^{(kT)^-}) = \int_0^{x_A^{(kT)^-}} \Omega_{B,k-1}(x_B^{(k-1)T^-}) f_{X_A}^{(T)}(x_A^{(kT)^-} - x_B^{(k-1)T^-}) dx_B^{(k-1)T^-}. \quad (18)$$

特殊地, 系统第 1 个周期 ($k=1$) 均使用全新设备, 故周期结束时运行设备状态退化为初始分布, 有

$$\Omega_{A,1}(x_A^{(T)^-}) = f_{X_A}^{(T)}(x). \quad (19)$$

温贮备设备 $T-\tau$ 时刻状态退化为初始分布, 有

$$\Omega_{B,1'}(x_B^{(T-\tau)^-}) = f_{X_B}^{(T-\tau)}(x). \quad (20)$$

温贮备设备在 T 时刻的状态概率为

$$\Omega_{B,1}(x_B^{(T)^-}) = \int_0^{\min(x_B^{(T)^-}, D_p^2)} \Omega_{B,1'}^1(x_B^{(T-\tau)^-}) f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(T)^-} - x_B^{(T-\tau)^-}) dx_B^{(T-\tau)^-} + f_{X_B}^{(\tau)}(x_B^{(T)^-}) \int_{D_p^2}^{\infty} \Omega_{B,1'}^1(x_B^{(T-\tau)^-}) dx_B^{(T-\tau)^-}. \quad (21)$$

4 实验验证

通过数值实验对系统状态概率的数值求解和决策模型的最优求解来验证所提出方法和模型的正确性和有效性, 并以汽轮发电机定子冷却水系统的电机

绕组为例进行案例实验,验证所提出策略和模型的适用性.

4.1 数值实验

设运行设备和温贮备设备单位时间内劣化增量分别服从 $\alpha_1 = 2.4, \beta_1 = 2$ 的 $\Gamma(\alpha_1, \beta_1)$ 分布,以及 $\alpha_2 = 1.4, \beta_2 = 2$ 的 $\Gamma(\alpha_2, \beta_2)$ 分布.运行设备的预防性维修阈值 $D_p^1 = 20$,温贮备设备预防性维修阈值 $D_p^2 = 15$,设备的失效阈值 $D_f = 25$ (单位: mm).

4.1.1 系统状态概率的数值求解

系统状态概率分布是整个模型求解关键所在.在给定周期 $T = 11$, 预检测时长 $\tau = 2$ (单位: 天) 的情况下,通过数值求解可得到系统状态概率密度函数 $\Omega_{A,k}(x), \Omega_{B,k}(x)$ 的近似数值解.

图2为不同运行周期运行设备和温贮备设备的概率密度 $\Omega_{A,k}(x), \Omega_{B,k}(x)$ 的近似数值解,其中用 $5D_f$ 对积分上限 ∞ 作截尾处理.随着运行周期 k 增大,维修次数增多,设备整体运行性能下降,故障概率增大, $\Omega_{A,k}(x)$ 和 $\Omega_{B,k}(x)$ 曲线明显右移,但是,由于温贮备设备有可替换的冷贮备设备作为备用,其状态较早地达到了稳态.

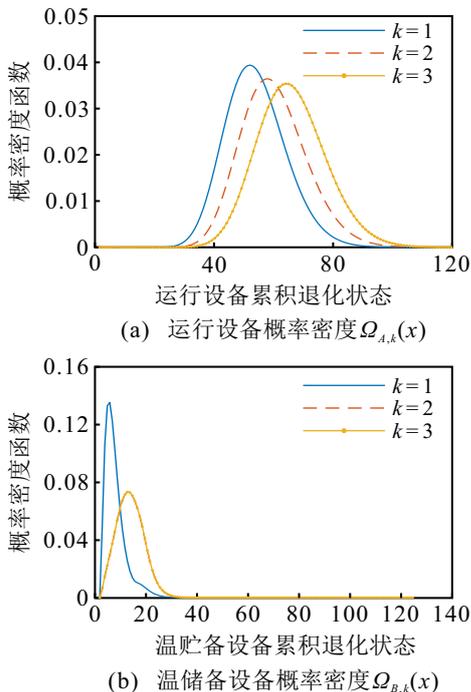


图2 随周期 k 变化的 $\Omega_{A,k}(x), \Omega_{B,k}(x)$ 近似解

图3~图6为在 $k = 4$ 时不同退化参数下 $\Omega_{A,k}(x)$ 和 $\Omega_{B,k}(x)$ 的结果.在其他参数不变的前提下,随着 α_1, β_1 增大,运行设备单位时间内退化增量均值不断增大,使得故障概率增大,状态概率密度曲线明显右移.但是, α_1, β_1 对温贮备设备的概率无明显影响,这是由于所有维修效果均可恢复如新,每个周期的温贮备设备均从全新状态开始导致的.随着 α_2, β_2 增大,

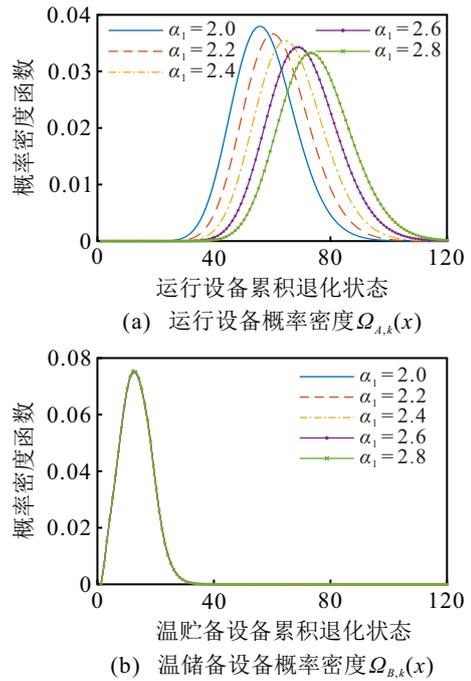


图3 随退化参数 α_1 变化的 $\Omega_{A,k}(x), \Omega_{B,k}(x)$ 近似解

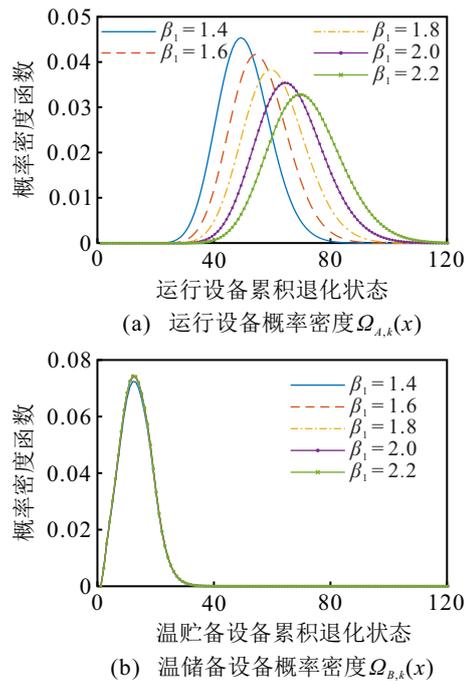


图4 随退化参数 β_1 变化的 $\Omega_{A,k}(x), \Omega_{B,k}(x)$ 近似解

温贮备设备状态概率变化的同时,运行设备状态概率也随之有较为明显的右移,这是由于温贮备的退化会导致运行设备初始状态的增大.

基于制定的离线视情维修策略,进一步分析决策变量对系统状态概率密度函数的影响.

图7为 α_2, β_2 随周期 T 的变化.随着切换周期 T 的增加,周期内的退化量随之增大,而使得周期结束时设备故障概率明显增大,因此,运行设备和温贮备设备的状态概率均有明显右移,运行设备因退化较快而右移程度较大.

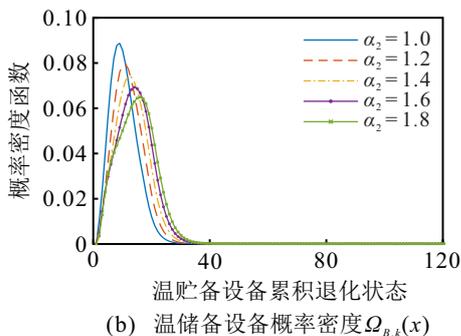
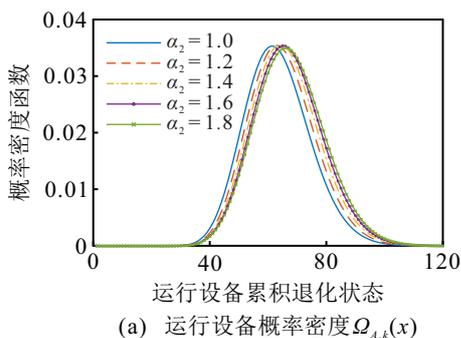


图5 随退化参数 α_2 变化的 $\Omega_{A,k}(x)$ 、 $\Omega_{B,k}(x)$ 近似解

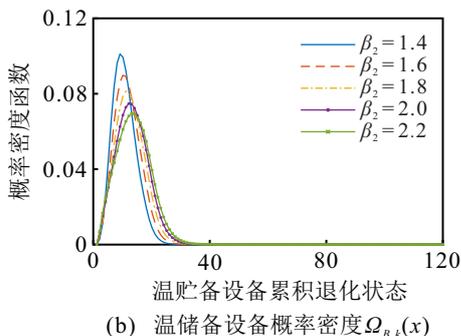
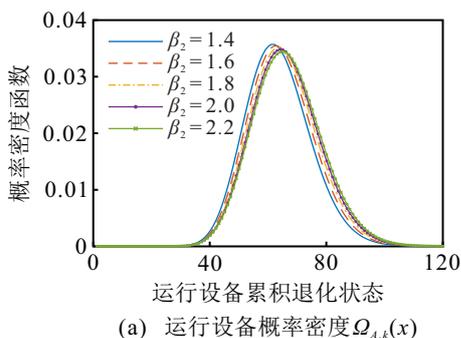


图6 随退化参数 β_2 变化的 $\Omega_{A,k}(x)$ 、 $\Omega_{B,k}(x)$ 近似解

图8显示随着 τ 的增加,温贮备设备在切换前的退化时间增大,而使得运行设备的初始状态增大,导致切换周期内发生失效的概率增大,故2个设备的状态概率密度曲线均呈右移现象。

图9显示随着温贮备设备预防性维修阈值 D_p^2 的增加,温贮备设备进行预防性维修的概率减小,而导致切换周期内发生失效的概率增大,故系统状态概率密度曲线右移。

本文假设切换下来的设备维修后的状态总是恢复如新,因此,运行设备周期切换后预防性维修阈值

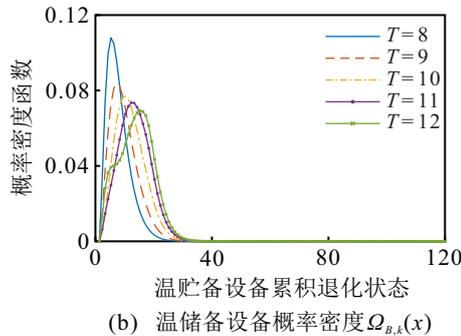
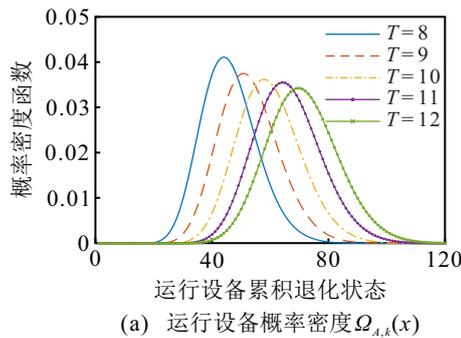


图7 不同切换周期T对应的稳态概率密度近似解

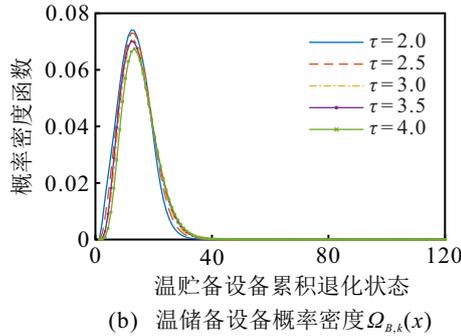
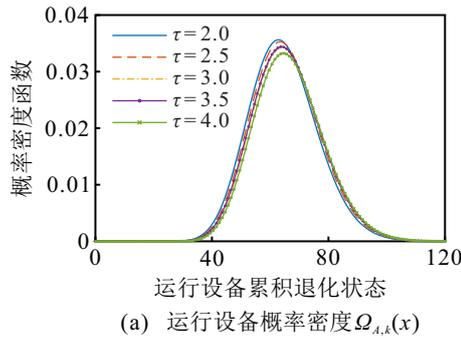


图8 不同预检测提前期 τ 对应的稳态概率密度近似解

D_p^1 对2个设备的退化状态概率均无明显影响,但是,阈值的不同会导致维修活动的不同,进而产生不同的成本,最终影响系统的费用率。

以上实验结果表明,退化参数和决策变量的变化均会对设备的状态概率产生影响,进而导致维修需求的概率发生改变,进一步影响系统的费用率。

4.1.2 维修决策模型求解

设 $C_{ins}^1 = C_{ins}^2 = 30$ 、 $C_s = 30$ 、 $C_m = 50$ 、 $C_p^1 = 150$ 、 $C_p^2 = 100$ 、 $C_f = 200$ 、 $C_{pr} = 50$ (单位:元), $n = 10$ 。采用遗传算法^[25]对模型进行求解。设置优化参数

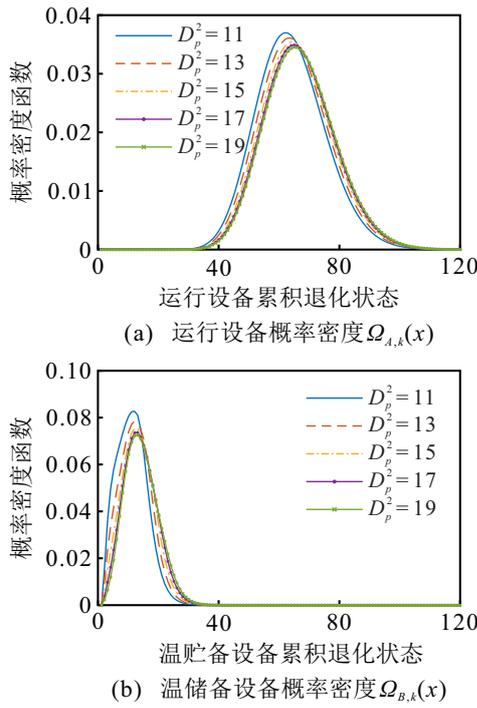


图9 不同维修阈值 D_p^2 对应的稳态概率密度近似解

如下:种群大小为20,最大遗传代数为50,代沟为0.8,交叉概率为0.8,变异概率为0.2,并取20次优化的最好值.为了验证所提出模型的适应性,本文从3个不

表2 系统维修费用参数对最优维修策略的影响

参数	值	费用率	最优决策变量值
C_{ins}	3	25.96	$T = 10, D_p^1 = 6.64, D_p^2 = 6.00, \tau = 0.6$
	30	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
	300	79.96	$T = 11, D_p^1 = 11.81, D_p^2 = 12.00, \tau = 0.6$
C_s	3	28.42	$T = 10, D_p^1 = 13.40, D_p^2 = 10.00, \tau = 0.3$
	30	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
	300	58.52	$T = 16, D_p^1 = 5.36, D_p^2 = 10.00, \tau = 0.3$
C_{pr}	5	29.59	$T = 7, D_p^1 = 11.65, D_p^2 = 9.00, \tau = 0.2$
	50	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
	500	43.71	$T = 10, D_p^1 = 17.33, D_p^2 = 13.00, \tau = 0.4$
C_p^1	15	30.19	$T = 10, D_p^1 = 11.34, D_p^2 = 8.00, \tau = 0.5$
	150	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
	1500	34.20	$T = 11, D_p^1 = 11.92, D_p^2 = 9.00, \tau = 0.5$
C_p^2	10	28.30	$T = 11, D_p^1 = 5.28, D_p^2 = 3.00, \tau = 0.7$
	100	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
	1000	56.54	$T = 10, D_p^1 = 12.03, D_p^2 = 8.00, \tau = 0.5$
C_f	20	14.30	$T = 7, D_p^1 = 11.91, D_p^2 = 4.00, \tau = 0.9$
	200	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
	2000	196.56	$T = 12, D_p^1 = 13.20, D_p^2 = 6.00, \tau = 0.5$

由表2可见,各项成本的增大均不可避免地导致费用率的增大.对于运行设备,随着各项成本的增加,决策结果通过增大切换周期避免频繁地切换、检测、更换和维修活动来降低费用率;当切换周期变化不明显,对系统的故障概率影响较小时,进一步增大预防性维修阈值以减少维修成本的方式达到降低费用

同起始周期 S 开始进行费用率的计算,假设从任意第 $S = (0, 1, \dots, \infty)$ 个周期开始,取 n 个有效运行周期,可得到不同时间区间内系统最优平均费用率以及最优策略参数如表1所示.

表1 不同时间区间内的最优平均费用率以及最优策略参数

S 的取值	费用率	决策变量
0	30.87	$T = 10, D_p^1 = 11.26, D_p^2 = 11.00, \tau = 0.6$
50	38.90	$T = 9, D_p^1 = 18.97, D_p^2 = 8.00, \tau = 0.8$
100	40.86	$T = 9, D_p^1 = 18.97, D_p^2 = 8.00, \tau = 0.8$

由表1可见,当系统从完好开始运行 n 个周期时,其平均费用率较低.随着系统运行一段时间后,由于整体运行性能的下降, n 个周期内的平均费用率出现较大上升.预检测预防维修阈值的减小提高了运行设备初始状态的可靠性.当系统运行到后期时,系统整体状态趋于平稳, n 个周期内的平均费用率变动幅度较小,对应的决策变量也趋于稳定.

4.1.3 灵敏度分析

分析成本参数对最优维修策略参数的影响,分别对成本参数 C_{ins} 、 C_s 、 C_p^1 、 C_p^2 、 C_f 、 C_{pr} 进行适当倍数的增加或缩小,结果如表2所示.

率;但是当切换周期过大时,无法保证设备的低故障概率,决策结果通过减小预防性维修阈值的方式增加维修概率,降低故障维修概率和成本.对于温贮备设备,随着各项成本增大,决策结果中同样通过增大预检测维修阈值,以减少维修成本,但是,同时也会因增加系统初始运行状态而增大运行设备故障概率和成

本,因而,此时以减小预检测周期长度的方式,缩短检测前贮备设备退化概率,但是,增加了贮备设备因退化导致的更换和维修成本。

4.2 案例实验

本文以汽轮发电机定子冷却水系统的电机绕组为例,进行所提出模型的验证。电机绕组作为汽轮发电机定子冷却水泵的关键部件,运行时绕组端部线棒处于复杂的振动环境中,在强磁场、高温、频繁振动的环境下,会造成绕组的损伤。电机绕组的状态可通过离线检测其绝缘磨损深度参数给出综合判断。因此,以电机绕组绝缘部件磨损退化为例进行建模。依据屈少平等^[26]对定子绕组端部线棒的主绝缘磨损深度的真实测量数据,可近似得到运行设备单位时间内劣化增量服从 $\alpha_1 = 4.9760$ 、 $\beta_1 = 0.4384$ 的 $\Gamma(\alpha_1, \beta_1)$ 分布,温贮备设备单位时间内劣化增量服从 $\alpha_2 = 1.7239$ 、 $\beta_2 = 0.2212$ 的 $\Gamma(\alpha_2, \beta_2)$ 分布,系统的失效阈值 $D_f = 5$ (单位:mm)。根据工程经验,设定 $C_{ins}^1 = C_{ins}^2 = 1$ 、 $C_s = 1$ 、 $C_m = 3$ 、 $C_p^1 = 12$ 、 $C_p^2 = 10$ 、 $C_f = 20$ 、 $C_{pr} = 1$ 、 $n = 10$ (单位:千元)。按照所建立的决策模型解得系统最优平均费用率以及相应的最优维修策略参数如下:CR = 0.1635, $T = 32$, $\tau = 2$ (单位:天), $D_p^1 = 3.0315$ 、 $D_p^2 = 2.3377$ (单位:mm)。求解结果与实际的工业案例是相符的,每隔32天对系统进行切换检测,在切换前2天对温贮备设备进行预检测以及相应的维修活动,在主绝缘磨损深度达到2.3377mm时进行温贮备设备的预防性维修,达到3.0315mm时进行运行设备的预防性维修。

表3为预检测提前期 τ 对最优维修策略的影响。由表3可见,若不采取预检测维修策略,即 $\tau = 0$ 时,直接进行切换,则系统的总费用率较高,决策结果会以增大切换周期和减小预防性维修阈值的方式增加维修概率,降低故障维修概率和成本,进而降低其费用率。采取预检测维修策略后,系统的总费用率减小,同时设备运行时间的降低,提高了系统稳定性,有效减少了非计划停机的发生。随着 τ 的增大,系统总费用率也因频繁的维修而随之上涨,最优切换周期 T 呈上升趋势,设备运行时间随之增加,通过减少切换次数来降低系统费用,同时,通过降低运行和温贮备设备的预防性维修阈值来保证系统的可靠运行。

表3 预检测提前期 τ 对最优维修策略的影响

参数	取值	最小费用率	决策变量
τ	0	0.18	$T = 36, D_p^1 = 3.53, D_p^2 = 2.48$
	2	0.16	$T = 32, D_p^1 = 3.83, D_p^2 = 2.76$
	4	0.17	$T = 34, D_p^1 = 3.21, D_p^2 = 2.74$
	6	0.17	$T = 35, D_p^1 = 3.13, D_p^2 = 2.73$

5 结论

本文针对冷/温混合贮备系统,制定了基于周期检测的离线视情维修策略,推导了各切换周期的系统状态概率密度函数的计算模型,建立了以最小费用率为目标的决策模型。通过遗传算法求解了最优维修策略,进行数值实验,验证了系统状态概率密度函数和所建立的维修优化模型的正确性和有效性,并分析了优化结果对模型各费用参数、退化参数的灵敏程度。以汽轮发电机定子冷却水系统的定子绕组为案例系统,验证了所提出策略和模型的有效性。实验结果表明,所提出模型和方法正确有效,考虑预检测的视情离线维修策略可有效降低系统的维修费用率。

后续的研究中,需要进一步考虑贮备系统的不完全切换、非完美维修等不同条件下冷/温混合贮备系统最优离线视情维修策略问题。在实际的工业应用中,系统的随机外部环境、动态结构变化、不定期检测等要素也需进一步考虑。

参考文献(References)

- [1] Jia X, Chen H, Cheng Z J, et al. A comparison between two switching policies for two-unit standby system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 148: 109-118.
- [2] Zhang J X, Du D B, Si X S, et al. Joint optimization of preventive maintenance and inventory management for standby systems with hybrid-deteriorating spare parts[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 214: 107686.
- [3] Ardakan M A, Hamadani A Z. Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 130: 132-139.
- [4] Mendes A A, Lorenzoni M W. Analysis and optimization of periodic inspection intervals in cold standby systems using Monte Carlo simulation[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 49: 121-130.
- [5] Alebrant M A, Ribeiro J L D, Coit D W. Optimal time interval between periodic inspections for a two-component cold standby multistate system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2017, 66(2): 559-574.
- [6] Jiang Y P, Chen M Y, Zhou D H. Condition-based switching and replacement policies for a two-unit warm standby redundant system subject to non-instantaneous switchover[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(33): 4616-4624.
- [7] Alkaff A, Qomarudin M N, Purwantini E, et al. Dynamic reliability modeling for general standby systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 161: 107615.
- [8] de Jonge B, Scarf P A. A review on maintenance

- optimization[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(3): 805-824.
- [9] Behboudi Z, Mohtashami B G R, Asadi M. Reliability modeling of two-unit cold stand by systems: Aperiodic switching approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 92: 176-195.
- [10] 王孟雅, 陈震, 潘尔顺. 基于马尔科夫决策的冷贮备串联系统状态维修与备件联合优化[J]. *工业工程与管理*, 2022, 27(6): 14-23.
(Wang M Y, Chen Z, Pan E S. Joint optimization of condition-based maintenance and spare parts for cold standby series system considering Markov decision[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2022, 27(6): 14-23.)
- [11] 杨天枢, 高文科. 基于拓展几何过程的冷贮备系统维修策略优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(1): 84-92.
(Yang T S, Gao W K. Optimization of maintenance policy for cold standby system based on extended geometric process[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(1): 84-92.)
- [12] Shen J Y, Hu J W, Ye Z S. Optimal switching policy for warm standby systems subjected to standby failure mode[J]. *IIE Transactions*, 2020, 52(11): 1262-1274.
- [13] 尹东亮, 胡涛, 陈童, 等. 考虑多维修台异步多重体假的温贮备冗余系统可靠性模型[J]. *控制与决策*, 2020, 35(4): 973-984.
(Yin D L, Hu T, Chen T, et al. Reliability analysis for warm standby redundancy system considering multiple asynchronous vacations of multiple maintenance stations[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 973-984.)
- [14] Bai S Y, Jia X, Cheng Z J, et al. Operation optimization model for warm standby system based on nonperiodic and imperfect multiple active switching policy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 167: 108001.
- [15] 金海波, 赵欣越, 桑雨. 双贮备系统冷/温/热贮备模型的优化选择研究[J]. *自动化学报*, 2020, 46(x): 1-16.
(Jin H B, Zhao X Y, Sang Y. Research on optimal selection for cold/warm/hot-standby patterns of dual-standby systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(x): 1-16.)
- [16] Golmohammadi E, Ardakan M A. Reliability optimization problem with the mixed strategy, degrading components, and a periodic inspection and maintenance policy[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 223: 108500.
- [17] Temraz N S Y. Comparison of fuzzy semi-Markov models for one unit with mixed standby units with and without preventive maintenance using regenerative point method[J]. *Heliyon*, 2021, 7(8): e07717.
- [18] Gao S, Wang J T. Reliability and availability analysis of a retrial system with mixed standbys and an unreliable repair facility[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 205: 107240.
- [19] Liu S J, Hu L M, Liu Z C, et al. Reliability of a retrial system with mixed standby components and Bernoulli vacation[J]. *Quality Technology & Quantitative Management*, 2021, 18(2): 248-265.
- [20] 刘勤明, 李永朋, 叶春明. 基于三阶段时间延迟模型的设备预防维修策略[J]. *控制与决策*, 2020, 35(7): 1780-1786.
(Liu Q M, Li Y P, Ye C M. Preventive maintenance plan of equipment based on three-stage time delay model[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(7): 1780-1786.)
- [21] 张晓红, 何于港, 张剑飞, 等. 相依多模失效下冷贮备系统最优切换及视情维护决策[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2672-2680.
(Zhang X H, He Y G, Zhang J F, et al. Optimal switching and condition based maintenance decision of cold standby system subject to dependent multimode failures[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2672-2680.)
- [22] Wang W, Wu Z Y, Xiong J L, et al. Redundancy optimization of cold-standby systems under periodic inspection and maintenance[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 180: 394-402.
- [23] Ma X Y, Liu B, Yang L, et al. Reliability analysis and condition-based maintenance optimization for a warm standby cooling system[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 193: 106588.
- [24] Kang R, Gong W J, Chen Y X. Model-driven degradation modeling approaches: Investigation and review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(4): 1137-1153.
- [25] 张晓红, 曾建潮. 基于状态空间分割的两部件系统机会维修优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(6): 1547-1560.
(Zhang X H, Zeng J C. State space partition based optimization of the opportunistic preventive maintenance of two-unit systems[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(6): 1547-1560.)
- [26] 屈少平, 张庆力, 胥高升. 640 MW 发电机定子绕组接地故障分析及其改进措施[J]. *电工技术*, 2022(16): 168-170.
(Qu S P, Zhang Q L, Xu G S. Analysis of grounding fault of stator winding of a 640 MW generator and its improvement measures[J]. *Electric Engineering*, 2022(16): 168-170.)

作者简介

张晓红(1980—), 女, 教授, 博士, 从事复杂系统维修决策与健康管理及其应用等研究, E-mail: zhangxh@tyust.edu.cn;

陶倩倩(1996—), 女, 硕士生, 从事复杂系统维修决策与健康管理的研 究, E-mail: 251434724@qq.com;

杨天祥(1996—), 男, 硕士生, 从事复杂系统维修决策与健康管理的研 究, E-mail: 2607756732@qq.com;

何于港(1997—), 男, 硕士生, 从事复杂系统维修决策与健康管理的研 究, E-mail: s20190725@stu.tyust.edu.cn;

甘婕(1976—), 女, 副教授, 博士, 从事智能优化、复杂系统的优化调度与健康管理等研究, E-mail: ganj@tyust.edu.cn.