

基于退化状态空间划分的风电机组视情维修决策

张晓红^{1,3}, 曾建潮^{1,2†}, 石冠男¹, 张欣^{1,3}

(1. 太原科技大学 工业与系统工程研究所, 太原 030024; 2. 中北大学 大数据学院, 太原 030051;
3. 山西人文社科重点研究基地 装备制造创新发展研究中心, 太原 030024)

摘要: 风场的运维成本约占其收入的三分之一之多, 风电机组的最优维修问题一直是风电系统降低运维成本的主要途径. 针对同一风场多台风力机组成的系统, 制定基于状态检测的视情机会维修策略, 提出基于退化状态空间划分的多设备系统状态维修决策建模方法, 在此基础上建立维修成本最小的解析模型, 以决策风力机最优的状态检测周期和维修阈值. 实验结果表明, 基于状态监测的风力机视情维修机会方案可以很好地节约系统运维成本.

关键词: 风电机组; 视情机会维修; 退化状态空间划分; 运维成本; 最优决策

中图分类号: TN165.3

文献标志码: A

Optimal decision of condition-based maintenance of wind turbines based on deterioration state-space partition

ZHANG Xiao-hong^{1,3}, ZENG Jian-chao^{1,2†}, SHI Guan-nan¹, ZHANG Xin^{1,3}

(1. Division of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Division of Big Data and Visual Computing, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Research Centre for Innovation and Development of Equipment Manufacturing Industry, Key Research Bases for Humanities and Social Sciences in Shanxi, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The operation and maintenance cost of wind farms accounts for about 1/3 of its revenue. The optimal maintenance of wind turbines is always the main way to reduce operation and maintenance cost of wind farms. Focusing on a system composed of multiple identical wind turbines, this paper presents a condition-based opportunity maintenance strategy for it. A deterioration state space partition method is proposed to analyze and model the opportunity maintenance strategy for the multi-unit system. Then, an analytic model is established based on the presented modeling method to determine the optimal inspection period of the system, and opportunistic and preventive maintenance thresholds of each unit jointly for minimizing the long-term cost rate. The experimental result verifies the performance of the modeling method. It also shows that the joint optimal maintenance decision can achieve significant performance for the wind turbine.

Keywords: wind turbines; condition-based opportunity maintenance; deterioration state space partition; operation and maintenance cost; optimal maintenance decision

0 引言

风机作为风电系统的核心装备, 在一次性安装投产后, 无需不断的燃料投入, 其可靠高效的运行成为直接影响风场经济效益的主要因素. 然而, 受地理位置偏远、环境恶劣等多种因素制约, 风机的运维约占到其收入的三分之一之多^[1]. 制定合理的维护方案, 确保风力机可靠运行的同时降低运维成本是风电系统优化运行中亟待解决的关键问题.

一个风场由多台功能独立、类型相似的风机构成, 是一个典型的同类多设备系统. 受维修条件和技术工具等限制, 风力机的单次维修启动成本很高^[2]. 考虑到风机各部件均装配有较为完备的传感系统, 可以实时获取系统运行状态, 研究风机关键部件的视情机会维修是风场优化运营的一种有效方式, 受到了众多专家学者的关注^[3-4].

多设备系统的维修决策问题是领域内专家关注

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71701140); 山西省青年基金项目(201601D021082, 201601D021065); 山西省高等学校科技创新项目(201802091); 太原科技大学校博士启动基金项目(20152021, 20162021).

责任编辑: 张文安.

†通讯作者. E-mail: zengjianchao@263.net.

的一个热点,文献[5]综述了近期的多部件系统维修决策模型.近年来,学者们又不断地将许多单部件系统中较为成功的视情维修决策方法引入到多部件系统维修模型中^[6-9].对于维修启动成本较高的设备,机会维修策略充分利用维修机会,将多个设备同时进行维修,以节省维修资源调度时间和成本,对风电场的维修也不失为一种好的策略^[7-8,10-11].

视情机会维修同时结合视情维修的准确性和机会维修的低成本性,越来越多的研究将其应用于风机系统的维修中^[12-15].前期的研究已给出了许多针对多设备系统的维修决策方法.然而,多数研究只针对部件数量少的系统展开^[7],或借助于仿真建模方法^[16],或采用启发式算法将多设备问题分解降维进行求解^[17-18]等.而风电机组设备数量远不止2或3个,且仿真模型过于耗时,分解降维方法很难得出准确度较高的最优解.因此,需寻找一种更为有效的多设备系统视情机会维修决策建模方法,才能解决风电机组的最优维修决策问题.

本文将风电机组系统建模为一个同类多设备系统,为其制定基于状态检测的视情机会维修策略,提出了基于退化状态空间划分的多设备系统状态维修决策建模方法.以此为基础,进一步建立最优解析模型,以决策系统最优的检测周期、机会和预防维修阈值,使得长期维修费用率最小.实验结果表明,基于状态监测的风力机视情维修机会方案可以很好地节约系统运维成本.

1 系统描述

1.1 系统退化特征

设某风场有 n 台同型风机.单台风机的关键部件随风力扭矩的作用呈现单调退化特征,可将其退化过程建模为一个连续磨损累积过程.设退化状态是一个可以通过检测获取的随机物理量,服从某种连续随机分布.任意设备 i ($i = 1, 2, \dots, n$)的退化过程如下:

1) t 时刻部件 i 的退化状态为随机量 $x_t^{(i)}$. $x_0^{(i)} = 0$,表示设备全新. $x_t^{(i)}$ 随时间不断增大,当 $x_i \geq D_f$ 时,部件发生累积退化故障,但仍可继续运行.

2) 设部件 i 单位时间内的退化增量 $\Delta x_k^{(i)} = x_k^{(i)} - x_{k-1}^{(i)}$ ($k \in N, t_k = t_{k-1} + \Delta t$)是服从概率密度函数为 $f(x)$ 的非负独立的随机变量,则 t 个单位时间内的退化增量服从概率密度函数为 $f^{(t)}(x)$ 的分布.

3) 用 $X^{(i)}$ 表示设备 i 关键部件(以下简称部件 i)的随机退化过程. n 个相同部件组成的系统的退化过程为 n 元随机分布 $(X_k)_{k \in N} = (X_k^{(1)}, X_k^{(2)}, \dots, X_k^{(n)})_{k \in N}$.

1.2 维修策略

采用基于周期检测的视情机会维修策略.为每个部件分别定义机会和预防维修阈值 D_o 和 D_p ,且有 $0 \leq D_o \leq D_p \leq D_f$.具体策略如下:

1) 每隔周期 T ($T = k_T \Delta t, k_T \in N$)对系统中所有设备的退化状态进行检测.检测瞬时完成,单次成本为 C_{ins} .任意检测时刻检测到的部件 i 的退化状态为 x_i .

2) 若 $D_p \leq x_i < D_f$,则预防维修部件 i ,单次维修成本为 C_p .

3) 若 $x_i \geq D_f$,则故障维修部件 i ,单次维修成本为 C_f .一般认为 $C_p \leq C_f$.

4) 若有任意部件 i 进行预防或故障后维修,则对其余满足 $D_o \leq x_j < D_p$ 的部件 j ($j \in \{1, 2, \dots, n\}, j \neq i$)同时进行机会维修.机会维修成本与预防维修相同.由于提前结束了部件的可运行寿命,对机会维修给予每单位退化量为 C_d 的惩罚.

5) 其余情况下,不对系统中的任意部件做任何处理.

所有维修瞬时完成,维修后的部件状态恢复如新.假设任意一次维修准备成本为 C_{set} ,该成本与维修的部件数量无关.

2 费用率模型

策略中检测周期、机会及预防维修阈值的选择将直接影响系统的维修频率和故障概率,进而影响维修成本,因此以最优检测周期、机会、预防维修阈值决策变量优化风场长期平均维修费用率.

更新定理常用于系统费用率建模中,以单个更新周期内的费用率近似表示长期平均费用率.由于随机运行特性,很难准确表述多设备系统的更新周期,特别是考虑机会维修后,任意设备维修与否与其自身和其余设备的状态均相关.但每一个检测周期,系统的状态确定了其维修需求、维修干预后,新的系统运行特性只依赖于维修后的退化状态,与历史状态无关,因此,可以利用半更新原理推导其演化特性^[6].策略中一个检测周期即为一个维修干预周期,系统费用率模型可以表示为

$$\min CR(t) = \min \Psi(T, D_o, D_p) = \min \frac{E(C(T))}{T};$$

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

一个检测周期内的平均费用 $E(C(T))$ 包括检测费用 C_{ins} 和平均维修及惩罚费用 $E(C_{\text{main}})$ 两部分,其中 $E(C_{\text{main}})$ 与检测状态所确定的维修需求有关.设任意检测时刻,系统中的维修需求为 $C_i P_j O_k$

($1 \leq i + j + k \leq n$), 表示有 i 台风机需要故障后维修, j 台风机需要预防性维修, k 台风机可以机会维修, 剩余 $n - i - j - k$ 台风机不维修, 其发生的概率为 $P_{C_i P_j O_k}(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则有

$$E(C(T)) = C_{\text{ins}} + \sum_{1 \leq i+j+k \leq n} [C_{\text{set}} + iC_f + (j+k)C_p + kC_d(D_p - D_o)] P_{C_i P_j O_k}(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (2)$$

系统维修需求及其概率的计算式模型是费用率模型求解的关键. 作者在前期研究^[19-20]中提出的多部件系统退化状态空间划分模型, 给出了同类多部件系统通用的维修决策建模分析和维修需求及其概率计算方法. 然而, 该模型对机会维修和预防维修未做区分. 而本文所定义的维修策略中, 机会维修需要增加成本惩罚, 需单独对其进行建模和计算. 下面给出考虑机会维修的退化状态空间划分法.

3 退化状态空间划分法

3.1 退化状态空间划分

图1~图3分别给出1、2、3部件系统区分机会和预防维修后的退化状态空间划分. 图中 $U_k (k = 0, 1, \dots, n)$ 表示系统有 k 个部件等待机会维修, 并采用分解形式表示维修需求组合, 如 $C_0 P_1 O_0$ 简化表示为 P , $C_1 P_1 O_0$ 简化表示为 CP , $C_0 P_1 O_2$ 简化表示为 POO .

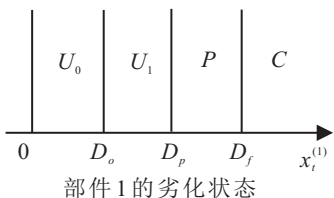


图1 单部件系统的退化状态空间划分

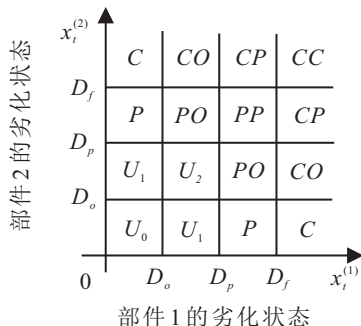
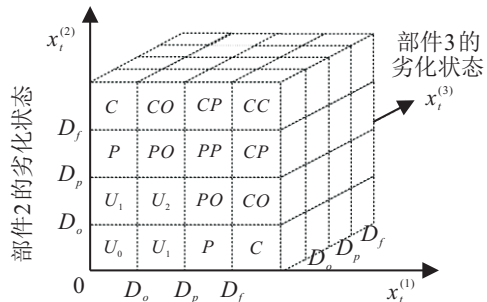


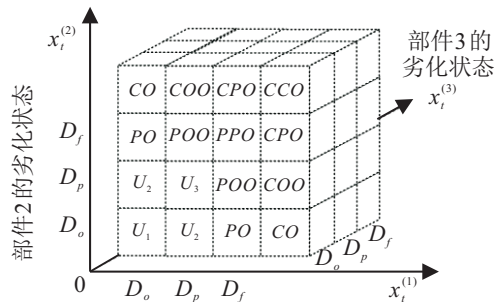
图2 相同两部件系统的退化状态空间划分

3.2 维修概率

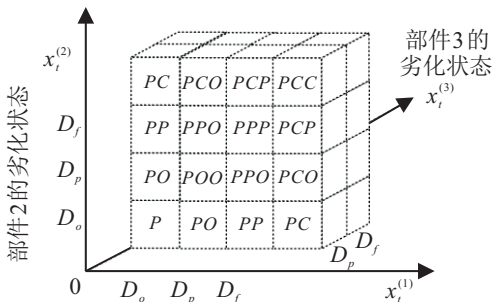
n 个相同部件中维修需求 $C_i P_j O_k$ 发生的概率 $P_{C_i P_j O_k}^n$ 与系统状态 (x_1, x_2, \dots, x_n) 相关. $\pi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示在考虑维修干预情况下系统状态 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的稳态概率密度函数.



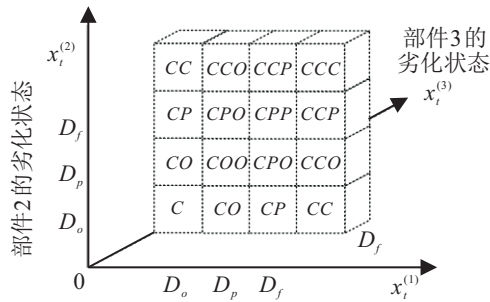
(a) $x_3 \in [0, D_o]$



(b) $x_3 \in [D_o, D_p]$



(c) $x_3 \in [D_p, D_f]$



(d) $x_3 \in [D_f, \infty)$

图3 相同三部件系统的退化状态空间划分

单部件系统中, 系统状态向量 $X = (x_1)$. 由图1所示的退化状态空间划分可得

$$P_{C_0 P_0 O_0}^1(X) = P_{U_0}^1(x_1) + P_{U_1}^1(x_1),$$

$$P_{U_0}^1(x_1) = \int_0^{D_o} \Omega(x_1) dx_1,$$

$$P_{U_1}^1(x_1) = \int_{D_o}^{D_p} \Omega(x_1) dx_1; \quad (3)$$

$$P_{C_0P_1O_0}^1(X) = \int_{D_p^{(1)}}^{D_f^{(1)}} \Omega(x_1)dx_1; \quad (4)$$

$$P_{C_1P_0O_0}^1(X) = \int_{D_f^{(1)}}^{\infty} \Omega(x_1)dx_1. \quad (5)$$

两部件系统中,系统状态向量 $X = (x_1, x_2)$. 由于部件相同且退化独立,系统状态退化分布满足 $\pi(X) = \pi(x_1, x_2) = \Omega(x_1)\Omega(x_2)$. 其维修概率可表示为

$$\begin{aligned} P_{C_0P_0O_0}^2(X) &= P_{U_0}^2(X) + P_{U_1}^2(X) + P_{U_2}^2(X) = \\ &P_{C_0P_0O_0}^1(x_1)P_{U_0}^1(x_2) + P_{C_0P_0O_0}^1(x_1)P_{U_1}^1(x_2), \\ P_{U_0}^2(X) &= P_{U_0}^1(x_1)P_{U_0}^1(x_2), \\ P_{U_1}^2(X) &= P_{U_1}^1(x_1)P_{U_0}^1(x_2) + P_{U_0}^1(x_1)P_{U_1}^1(x_2), \\ P_{U_2}^2(X) &= P_{U_1}^1(x_1)P_{U_1}^1(x_2); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{C_0P_1O_0}^2(X) &= P_{C_0P_1O_0}^1(x_1)P_{U_0}^1(x_2) + \\ &P_{U_0}^1(x_1)P_{C_0P_1O_0}^1(x_2); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{C_0P_1O_1}^2(X) &= P_{C_0P_1O_0}^1(x_1)P_{U_1}^1(x_2) + \\ &P_{U_1}^1(x_1)P_{C_0P_1O_0}^1(x_2); \end{aligned} \quad (8)$$

$$P_{C_0P_2O_0}^2(X) = P_{C_0P_1O_0}^1(x_1)P_{C_0P_1O_0}^1(x_2); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_{C_1P_0O_0}^2(X) &= P_{C_1P_0O_0}^1(x_1)P_{U_0}^1(x_2) + \\ &P_{U_0}^1(x_1)P_{C_1P_0O_0}^1(x_2); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_{C_1P_0O_1}^2(X) &= P_{C_1P_0O_0}^1(x_1)P_{U_1}^1(x_2) + \\ &P_{U_1}^1(x_1)P_{C_1P_0O_0}^1(x_2); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_{C_1P_1O_0}^2(X) &= P_{C_1P_0O_0}^1(x_1)P_{C_0P_1O_0}^1(x_2) + \\ &P_{C_0P_1O_0}^1(x_1)P_{C_1P_0O_0}^1(x_2); \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_{C_2P_0O_0}^2(X) = P_{C_1P_0O_0}^1(x_1)P_{C_1P_0O_0}^1(x_2). \quad (13)$$

一般地,在含有 $n(n \geq 2)$ 个相同部件的系统中,当 $i + j + k = 0$ 时,需要区分系统中等待机会维修的部件数量,因此将通式分为以下两种情况:

1) 当 $i + j + k = 0$ 时,有

$$\begin{aligned} P_{C_0P_0O_0}^n(X) &= \\ &P_{U_0}^n(X) + P_{U_1}^n(X) + \dots + P_{U_{n-1}}^n(X) + P_{U_n}^n(X) = \\ &P_{C_0P_0O_0}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{U_0}^1(x_n) + \\ &P_{C_0P_0O_0}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{U_1}^1(x_n); \\ P_{U_0}^n(X) &= P_{U_0}^{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})P_{U_0}^1(x_n); \\ P_{U_i}^n(X) &= P_{U_i}^{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})P_{U_0}^1(x_n) + \\ &P_{U_{i-1}}^{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})P_{U_1}^1(x_n), \\ &0 < i < n; \\ P_{U_n}^n(X) &= P_{U_{n-1}}^{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})P_{U_1}^1(x_n). \end{aligned} \quad (14)$$

2) 当 $1 \leq i + j + k \leq n$ 时,有

$$\begin{aligned} P_{C_iP_jO_k}^n(X) &= \\ &I_{(i+j \geq 1, k \geq 0, 1 \leq i+j+k \leq n)} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &P_{C_iP_jO_k}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{U_0}^1(x_n) + \\ &I_{(i+j \geq 1, k \geq 1, 2 \leq i+j+k \leq n)} \times \\ &P_{C_iP_jO_{k-1}}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{U_1}^1(x_n) + \\ &I_{(j \geq 1, i+j \geq 2, k \geq 0, 2 \leq i+j+k \leq n)} \times \\ &P_{C_{i-1}P_jO_k}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{C_1P_0O_0}^1(x_n) + \\ &I_{(i=1, j=0, k \geq 0, 1 \leq i+k \leq n)} \times \\ &P_{U_k}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{C_1P_0O_0}^1(x_n) + \\ &I_{(j \geq 1, i+j \geq 2, k \geq 0, 2 \leq i+j+k \leq n)} \times \\ &P_{C_iP_{j-1}O_k}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{C_0P_1O_0}^1(x_n) + \\ &I_{(i=0, j=1, k \geq 0, 1 \leq i+k \leq n)} \times \\ &P_{U_k}^{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})P_{C_0P_1O_0}^1(x_n). \end{aligned} \quad (15)$$

3.3 稳态联合概率密度的计算

由于各部件退化独立,有

$$pi(x_1, \dots, x_n) = \Omega(x_1)\Omega(x_2) \dots \Omega(x_n).$$

只需求出任意部件 i 的稳态概率密度 $\Omega(x_i)$ 即可.

如前所述,多部件系统的状态更新满足半更新特性,可以利用半更新原理推导其演化特性. 系统的一次检测就是一个半更新周期. 用 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 和 $\tilde{Y} = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n)$ 分别表示周期开始时刻维修前后的系统状态, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示周期结束时的系统状态. 遍历整个状态空间,分析一个半更新周期内所有可能的维修活动,即可推导出部件 i 退化过程的稳态概率密度函数 $\Omega(x_i)$. 未考虑机会维修时部件的稳态概率密度函数^[19]为

$$\begin{aligned} \Omega(x_i) &= f^{(t)}(x_i) \int_{D_p}^{\infty} \Omega(y_i)dy_i + \\ &\int_0^{\min(x_i, D_p)} \Omega(y_i)f^{(t)}(x_i - y_i)dy_i. \end{aligned} \quad (16)$$

在考虑机会维修后,部件的维修与否不仅与自身退化状态有关,也与其余部件是否为其提供维修机会有关. 分两种情况进行讨论:

1) 部件 i 被维修. 当其余 $n-1$ 个部件没有维修需求时,部件的状态落在区域 $[D_p, \infty)$ 中被维修;当其余 $n-1$ 个部件至少有一个被维修时,部件的状态落在区域 $[D_o, \infty)$ 中被维修. 维修后状态恢复为 $\tilde{y}_i = 0$,再经过一个检测周期后退化到 x_i 的概率为 $f^{(T)}(x_i)$.

2) 部件 i 不被维修. 当其余 $n-1$ 个部件没有维修需求时,部件的状态落在区域 $[0, D_p)$ 中不被维修;当其余 $n-1$ 个部件至少有一个被维修时,部件的状态落在区域 $[0, D_o)$ 中不被维修. 此时,部件状态保持 $\tilde{y}_i = y_i$,再经过一个检测周期后退化到 x_i 的概率为 $f^{(T)}(x_i - y_i)$.

其余 $n - 1$ 个均不被维修的概率 $P_{no_main}^{n-1}$ 为

$$P_{no_main}^{n-1} = \left[\int_0^{D_p} \Omega(y) dy \right]^{n-1}. \quad (17)$$

其余 $n - 1$ 个部件至少有一个被维修的概率则为 $1 - P_{no_main}^{n-1}$. 总之, 部件的稳态概率函数可以表示为

$$\begin{aligned} \Omega(x_i) = & \left[\int_0^{D_p} \Omega(y) dy \right]^{n-1} \left[\int_{D_o}^{D_p} \Omega(y_i) f^{(T)}(x_i) dy_i + \right. \\ & \int_0^{\min(x_i, D_p)} \Omega(y_i) f^{(T)}(x_i - y_i) dy_i - \\ & \left. \int_0^{\min(x_i, D_o)} \Omega(y_i) f^{(T)}(x_i - y_i) dy_i \right] + \\ & f^{(T)}(x_i) \left[1 - \int_0^{D_o} \Omega(y_i) dy_i \right] + \\ & \int_0^{\min(x_i, D_o)} \Omega(y_i) f^{(T)}(x_i - y_i) dy_i. \end{aligned} \quad (18)$$

当 $n = 1$ 时, 有

$$\begin{aligned} \Omega(x_i) = & f^{(T)}(x_i) \left[1 - \int_0^{D_p} \Omega(y_i) dy_i \right] + \\ & \int_0^{\min(x_i, D_p)} \Omega(y_i) f^{(T)}(x_i - y_i) dy_i. \end{aligned} \quad (19)$$

这与式(16)的推导结果是一致的.

式(18)所示 $\Omega(x_i)$ 的隐式积分方程表达式很难直接求其解析解, 下面试图求取其数值解. 利用正交近似数值求解规则可得每一个正交点的近似方程为

$$\begin{aligned} \Omega(ih) = & g(ih) - g(ih)h \sum_{j=1}^{i_o} \Omega(jh) + \\ & h \sum_{j=1}^{\min(i, i_o)} \Omega(jh)g(ih - jh) + \\ & \left[h \sum_{j=1}^{i_p} \Omega(jh) \right]^{M-1} \left[g(ih)h \sum_{j=i_o}^{i_p} \Omega(jh) + \right. \\ & h \sum_{j=1}^{\min(i, i_p)} \Omega(jh)g(ih - jh) - \\ & \left. h \sum_{j=1}^{\min(i, i_o)} \Omega(jh)g(ih - jh) \right], \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$x = ih, D_o = i_o h, D_p = i_p h.$$

设解向量为 $W = (\Omega(h), \Omega(2h), \dots, \Omega(i_{\max}h))'$, 令 Ω_i 表示向量元素 $\Omega(ih)$, g_i 表示向量元素 $g(ih)$, $A_{ij}^k (k = 1, 2, \dots, 6)$ 分别表示矩阵 $A_{i_{\max} \times i_{\max}}^k$ 中的元素, 其中

$$A_{ij}^1 = \begin{cases} hg(ih), & i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \\ j = 1, 2, \dots, i_o; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (21)$$

$$A_{ij}^2 = \begin{cases} -hg(ih - jh), & i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \\ j = 1, 2, \dots, \min(i, i_o); \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (22)$$

$$A_{ij}^3 = \begin{cases} h, & i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \\ j = 1, 2, \dots, i_p; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (23)$$

$$A_{ij}^4 = \begin{cases} -hg(ih), & i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \\ j = i_o, \dots, i_p; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (24)$$

$$A_{ij}^5 = \begin{cases} -hg(ih - jh), & i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \\ j = 1, 2, \dots, \min(i, i_p); \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (25)$$

$$A_{ij}^6 = \begin{cases} hg(ih - jh), & i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \\ j = 1, 2, \dots, \min(i, i_o); \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (26)$$

则式(20)可以表示为

$$\begin{aligned} I\Omega + A_1\Omega + A_2\Omega + \\ [A_3\Omega]^{n-1}[A_4\Omega + A_5\Omega + A_6\Omega] = G. \end{aligned} \quad (27)$$

令 $K_1 = I + A_1 + A_2, K_2 = A_4 + A_5 + A_6$, 式(27)可以表示为

$$K_1\Omega + [A_3\Omega]^{n-1}K_2\Omega = G. \quad (28)$$

当 $n = 1$ 时, $K_1\Omega + K_2\Omega = G$ 是含有 i_{\max} 个未知数的线性方程组, 求解线性方程组即可得解. 当 $n \geq 2$ 时, 该式为含有 i_{\max} 个未知数的非线性方程组, 可以采用迭代计算方法求解.

4 数值实验

以风机主轴承为例, 设其退化为Gamma过程. 退化增值参数为 $\alpha = 0.04, \beta = 1.3$. 假设模型中成本参数 $C_{ins} = 50, C_{set} = 500, C_p = 100, C_c = 1000, C_d = 30$, 以验证本文所提出方法的有效性和建立模型的正确性.

4.1 稳态概率密度函数

退化过程不同, 联合概率密度函数的存在条件不同, 形成稳态条件的周期也不同. 图4显示了退化参数为: $t = 5, D_p^{(i)} = 12, D_f^{(i)} = 20$, 并给出以 $5D_f$ 对 ∞ 进行截尾后 $\Omega(x)$ 的近似解. 当 $n \geq 3$ 时, 由于 $\left[\int_0^{D_p} \Omega(y) dy \right]^{n-1}$ 的取值很小, 使得稳态概率密度函数的解变化很小.

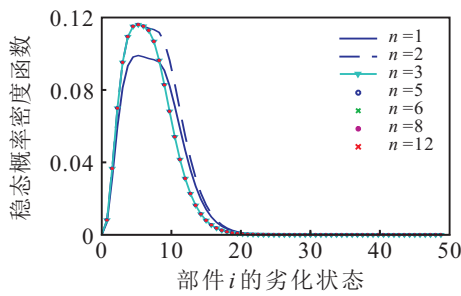


图4 稳态概率密度函数的近似解

4.2 维修策略联合优化

式(1)建立的是带约束的非线性单目标优化模型,选用鲁棒性较好的遗传算法对目标参数进行联合优化,求解模型的近似最优解.

图5给出了当系统中的部件数量分别为 $n = 5$ 和 $n = 10$ 时,在给定 $D_o = 15$ 和 $D_p = 18$ 的前提下,系统平均费用率随 T 的变化趋势.当 T 较小时,检测过于频繁,总费用率较高;随着 T 的增大,系统故障概率及成本随之增大,与检测成本形成了一个权衡,二者达到平衡,费用率最小.图5同时表明,当部件数量较多时,同等条件下,系统的平均费用率较低,这是由于部件越多,维修机会越多.

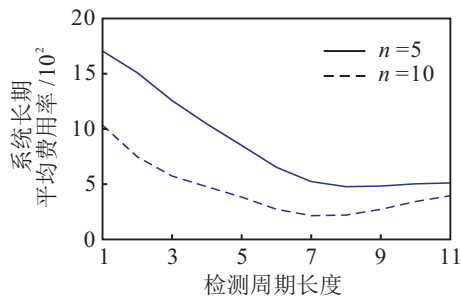


图5 检测周期对费用率的影响

图6和图7分别给出了在设定参数 $T = 5, D_o = D_p - 3$ 的前提下, $n = 5$ 和 $n = 10$ 时,系统平均费用率随维修阈值的变化趋势.由图可知,当 D_o 和 D_p 较小时,维修概率较高,故障概率较小,系统的平均费用率相对较小.随着 D_o 和 D_p 的增大,各部件机会和预防维修概率减小,故障概率上升,平均费用率增加速度明显加快.在维修阈值不断变化的过程中,同样存在一个使得系统费用率最小的极值点.比较图6和图7同样可以发现,机会维修导致了同等条件下部件数量较多的系统其平均费用率较低.

设置遗传算法的参数:种群大小20,最大遗传代数50,代沟0.8,交叉概率0.8,变异概率0.2. $n = 5$ 时优化得到的近似最优解为 $T = 6, D_p = 18.543440, D_o = 7.096368$,对应的最小费用率 $CR(t) = 339.668501$,单位部件的最小费用率为67.9397002; $n = 10$ 时优化得到的近似最优解为 $T = 5, D_p = 18.456445, D_o =$

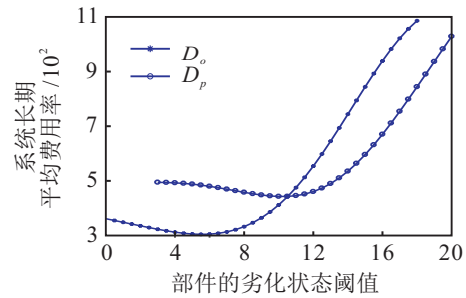


图6 $n = 5$ 时费用率随各部件维修阈值的变化

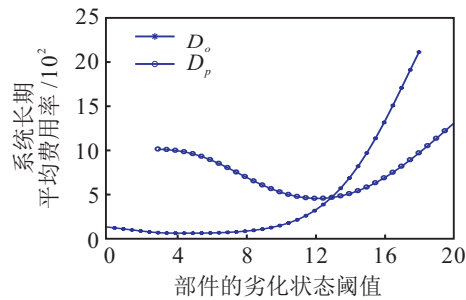


图7 $n = 10$ 时费用率随各部件维修阈值的变化

4.047834,对应的最小费用率 $CR(t) = 520.739952$,单位部件的最小费用率为52.0739952.若不考虑多部件的机会维修,单独对一个部件进行最优维修决策优化,则可解得最优维修策略为: $T = 10, D_p = 12.757696$,单部件单位时间内的最小费用率为95.9541.显然,考虑部件的经济相关性,依据系统的整体退化特性进行系统级的最优维修决策可以取得更好的经济效益.

4.3 灵敏度分析

以 $n = 5$ 为例,分别将成本参数 $C_{ins}, C_{set}, C_p, C_f, C_d$ 增大和缩小10%,分析该参数对最优维修策略参数的影响,结果如表1~表5所示.

表1 C_{ins} 对维修策略的影响

C_{ins}	$CR(T)$	T	D_o	D_p	Gap_o
5	317.833701	6	6.795227	19.860592	13.06537
50	339.668501	6	7.096368	18.543440	11.44707
500	425.391274	7	8.999279	17.894783	8.895504

表2 C_{set} 对维修策略的影响

C_{set}	$CR(T)$	T	D_o	D_p	Gap_o
50	248.610521	6	6.589778	17.525176	10.9354
500	339.668501	6	7.096368	18.543440	11.44707
5000	826.268868	6	7.887848	19.476272	11.58842

表1中,随着 C_{ins} 的增加,为降低总费用率, T 随之增大,以减少检测次数,降低检测费用.随着 T 的增大,故障概率也随之增大,进一步增加了故障维修费

表3 C_p 对维修策略的影响

C_p	CR(T)	T	D_o	D_p	Gap _o
10	267.330 000	6	6.995 646	17.436 333	10.440 69
100	339.668 501	6	7.096 368	18.543 440	11.447 07
1000	462.396 772	6	6.897 277	19.760 170	12.862 89

表4 C_f 对维修策略的影响

C_f	CR(T)	T	D_o	D_p	Gap _o
100	94.648 066	11	8.000 000	19.398 725	11.398 73
1000	339.668 501	6	7.096 368	18.543 440	11.447 07
10000	858.155 562	3	2.497 893	9.912 476	7.414 583

表5 C_d 对维修策略的影响

C_d	CR(T)	T	D_o	D_p	Gap _o
3	131.507 697	6	3.798 180	19.406 611	15.608 43
30	339.668 501	6	7.096 368	18.543 440	11.447 07
300	453.893 570	6	6.696 853	10.441 801	3.744 948

用. 权衡各种费用后优化得到的部件最优预防维修阈值均有所下降, 以增加系统中各部件的预防维修概率. 由于部件之间较强的经济依赖关系($C_{set} = 500$), 部件的机会维修区域(表1中用Gap_o表示, $Gap_o = D_p - D_o$)随 C_{ins} 的增加而减小, 以权衡得到较低的费用率.

表2中, 系统的 C_{set} 越大, 单次维修的成本越高, 部件之间的经济相关性越强, 因此随着 C_{set} 的增加, 为减少维修次数, 部件的机会维修和预防维修阈值均有明显增加. 同时, 为了提高各部件的机会维修概率, 部件的机会维修区域随 C_{set} 的增大而增大, 进一步节约系统的维修成本.

表3中, 当 C_p 接近 C_f 时, 对部件的预防维修并不能节约更多的故障维修成本, 因此优化得到的最优预防维修阈值也接近于故障阈值, 以减少检测和维修次数, 进而减少预防维修概率. 当 C_p 高于 C_{set} 时, 为了降低系统的故障率, 最优策略偏向于完成更多的机会维修, 因此随着 C_p 的不断增大, 部件的机会维修区域也不断增大. 此外, C_p 的调整对系统的费用率和检测周期没有明显影响.

表4中, 当 C_f 增大时, 系统的检测周期和部件的预防维修阈值均不断减小, 以增加其预防维修的概率, 减少该故障概率. 当部件 C_f 特别大时, 部件的机会维修区域也会随之明显减小, 以增加部件在故障前

维修的概率, 降低故障概率和故障维修成本. 此外, 由于在各种费用参数中, C_f 所占的比例较大, 随着 C_f 的增大, 系统的费用率明显增大.

表5中, 当 C_d 逐渐增大时, 最优维修策略趋向于缩小部件的机会维修区域以减少其机会维修的概率. 机会维修的减少增加了部件故障的概率, 因此部件的预防维修阈值也随之减小, 以增加其预防维修的概率.

5 结论

本文针对同一风场多台风机组成的系统, 制定了周期检测的视情机会维修策略, 提出了退化状态空间划分方法, 以分析系统所有可能的维修分组及其维修概率作为维修优化建模的依据, 推导了部件退化状态的稳态概率密度函数的显式表达式和数值求解方法, 并应用所提出的方法建立了基于半更新理论的系统长期平均费用率模型, 寻找系统全局最优的检测间隔和部件的机会和预防维修阈值. 数值实验结果表明, 退化状态空间划分法和费用率模型是正确有效的, 视情机会维修方案可以有效节约系统运维成本.

后续需进一步考虑非零的维修时间和非完美的维修效果等要素, 以及进一步建立风机系统的可靠性和可用度模型, 并将其维修和备件库存进行联合优化.

参考文献(References)

- [1] Mahmood Shafiee. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives[J]. Renewable Energy, 2015, 77: 182-193.
- [2] Xiaoquan S C Z. Condition-based maintenance optimization for wind turbines based on semi-Markov decision process[J]. J of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 44-49.
- [3] Teng W, Zhang X L, Liu Y B, et al. Prognosis of the remaining useful life of bearings in a wind turbine gearbox[J]. Energies, 2017, 10(1): 1-16.
- [4] Zhang X, Zeng J. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems[J]. European J of Operational Research, 2017, 262(2): 479-498.
- [5] Yun W Y, Endharta A J. Preventive maintenance of consecutive multi-unit systems[M]. Swit Zerland: Springer International Publishing, 2017: 27-51.
- [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] Tian Z, Liao H. Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(5): 581-589.
- [8] Koochaki J, Bokhorst J A C, Wortmann H. Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance[J]. *Int J of Production Research*, 2012, 50(23): 6918-6929.
- [9] Ding F, Tian Z. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds[J]. *Renewable Energy*, 2012, 45: 175-182.
- [10] Zhou X, Xi L, Lee J. Opportunistic preventive maintenance scheduling for a multi-unit series system based on dynamic programming[J]. *Int J of Production Economics*, 2009, 118(2): 361-366.
- [11] Zhu Q, Peng H, Houtum G J V. A condition-based maintenance policy for multi-component systems with a high maintenance setup cost[J]. *OR Spectrum*, 2015, 37(4): 1-29.
- [12] Hasnida A S, Shahrul K. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches: A review[J]. *J of Quality in Maintenance Engineering*, 2014, 20(2): 98-121.
- [13] Sarker B R, Faiz T I. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy[J]. *Renewable Energy*, 2016, 85: 104-113.
- [14] Zhang C, Gao W, Guo S, et al. Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance[J]. *Renewable Energy*, 2017, 103: 606-612.
- [15] Lu Y, Sun L, Kang J, et al. Opportunistic maintenance optimization for offshore wind turbine electrical and electronic system based on rolling horizon approach[J]. *J of Renewable & Sustainable Energy*, 2017, 9(3): 182-193.
- [16] Wang L, Chu J, Mao W. A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 194(1): 184-205.
- [17] 胡瑾秋, 张来斌. 基于故障超前防御的复杂油气生产设备机会维护模型[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(12): 167-175.
(Hu J Q, Zhang L B. Opportunistic maintenance strategy for complex oil and gas production equipment based on fault preventive defense[J]. *J of Mechanical Engineering*, 2013, 49(12): 167-175.)
- [18] Zhang, Z, Wu S, Li B, et al. Optimal maintenance policy for multi-component systems under Markovian environment changes[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(18): 7391-7399.
- [19] Zhang X, Zeng J. Deterioration state space partitioning method for opportunistic maintenance modelling of identical multi-unit systems[J]. *Int J of Production Research*, 2014, 53(7): 2100-2118.
- [20] 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.)

作者简介

张晓红(1980—), 女, 副教授, 博士, 从事复杂系统预测与健康管理及其应用等研究, E-mail: zhangxiaohong1111@126.com;

曾建潮(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统预测与健康、智能计算等研究, E-mail: zengjianchao@263.net;

石冠男(1991—), 男, 硕士生, 从事复杂系统预测与健康及其应用的研究, E-mail: 214181788@qq.com;

张欣(1995—), 女, 硕士生, 从事复杂系统预测与健康及其应用的研究, E-mail: 996346663@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)