第41卷 第8期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 8
2020年8月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Aug., 2020

文章编号:0254-0096(2020)08-0314-09

排队论在风电场最优成组维修决策中的应用

王金贺[1]，曾建潮[1,2]

（1. 太原科技大学工业与系统工程研究所，太原 030024；2. 中北大学计算机与控制工程学院，太原 030051）

摘 要：针对风电场高昂的维修准备成本，将单台风电机组（wind turbine，WT）作为整体，风电场视为一个由多设备组成的并联系统，研究风电场的最优成组维修策略。根据排队论分析风电场中WT发生停机性故障的规律，描述对应的维修排队模型，在此基础上，通过固定故障率给出计算单台WT发生停机性故障后等待被维修的平均时间。最后，与传统维修方式对比，以节省总维修成本最大为目标建立最优成组维修模型。数值实验和灵敏度分析验证该模型的正确性和有效性，算例分析结果表明，该成组维修策略能有效降低风电场整体维修成本，实现风电场整体经济效益最优。

关键词：风电机组；维修准备；排队论；维修；灵敏度分析

中图分类号：TK83 **文献标志码**：A

0 引 言

风能作为新能源之一，其优势[1]和发展趋势[2]有目共睹。随着风电场规模的扩大以及风电机组复杂性的增加，风电场（尤其是海上风电场）的运维成本（operation and maintenance，O&M）一直居高不下[3]。降低风电场整体的维修成本是提高风电场综合效益的关键。目前，对于风电场的研究主要分为2类：关键部件的研究和风电场布局与选址优化的探讨。学者们对于风电机组（wind turbine，WT）关键部件的研究从单部件到多部件，建立了各种故障诊断和预测模型。腾伟等[4]和Van der linden等[5]根据采集到的故障数据开发了WT的故障数据管理系统。Nielsen等[6]利用贝叶斯事先预测决策理论优化配置海上风电机组，使其风险最小。文献[7-10]分析了风电场的实际运行数据并对其进行仿真，建立了考虑确定性和随机性的风电机组维修模型。

随着各种维修方式的出现，学者们开始将多种维修方式相结合，例如预防性替换和预防性维修策略的结合[11-12]以及衍生出的机会维修策略。将可靠性作为约束，以经济性最好和停机次数最少为优化目标，研究WT中变桨系统的多部件机会维修策略[13-14]。将机会维修和状态维修相结合，提出状态机会维修策略的概念[15-17]和以及多属性的风电机组的齿轮箱状态维修策略[18]。Shafiee[19]给出了最佳机会状态维修（opportunity condition-based maintenance，OCBM）模型，系统分析了WT的退化过程。李志雄等[20]探究轴承裂变探测的多维变量分解（multiple dimensional variable decomposition，MDVD）模型。文献[21-22]在考虑经济相关性的前提下，利用混合风险比例模型来描述非完美维修对故障维修的作用，构建了保证可靠性条件下的非完美维修的机会维修策略模型。

以上研究在一定程度上提高了关键部件的可靠性、降低了部件的维修成本，但在实际选址中，大型风电场地处偏远，特别是海上风电场，安装和运行环境恶劣，在维修过程中，维修资源能否及时到达也严重影响风电场的维修成本。为此，有学者对风电场的选址和布局进行了研究。肖运启等[23]根据风电场的运行状态数据，建立了风电场的趋势状态预测模型，尝试从整体合理分配、调度维修资源。Bansal等[24]通过生态地理学理论确定风电场中WT的安装数目。Nicolas等[25]则考虑了风电场中尾流影响的问题。

收稿日期：2018-03-05

基金项目：国家自然科学基金（71701140；61573250）；山西省青年科技研究基金（201601D021082；201601D021065）；太原科技大学校青年基金（20153015）；太原科技大学校博士启动基金（20152021）

通信作者：曾建潮（1963—），男，博士、教授、博士生导师，主要从事复杂系统建模与仿真、智能计算、复杂系统故障预测与健康管理等方面的研究。zengjianchao@263.net

Paradal 等[26]和韩邦成等[27]则分别通过高斯后模型和超启发式数学方法对风电场布局中的选址进行优化，前者利用遗传算法最小化年风能成本，最大化风电场经济效益，后者利用建立的超启发式数学模型最小化陆地使用面积，最大化风能年产量。文献[28-30]主要从海上风电场风向的不确定性角度研究海上风电场的布局问题。也有学者根据海上风电场的多标准选择确定风电场的统计模型[31-33]。

风电场选址和布局的优化固然重要，然而风电场位置和 WT 数量一旦确定，未来几十年面对的都是风电场的运维问题，而对于风电场整体的运维策略鲜有文献介绍。风电场由很多台功能和规格相同的 WT 组成，这些 WT 在维修过程中存在很强的经济相关性。由于风电场的选址一般地势较高，或者处于条件恶劣的海上，维修时需要动用大型机械（比如起重机或者塔吊等），而这些维修设备的租赁费用和运输费用远远超过了其真正施工时的维修费用，若能合理调度这些维修资源，最小化维修成本，对于风电场综合经济效益的提高将是一个重大突破。基于此，本文针对风电场维修时高昂的维修准备费用，将单台 WT 作为一个整体，风电场作为一个多设备系统进行研究。利用排队论方法描述 WT 发生故障时的维修排队模型，以成组维修成本较单台 WT 故障停机立即维修的维修成本节省最大为目标，建立风电场最优成组维修模型。在此模型下，通过权衡维修准备费用和 WT 的停机等待损失确定最优维修策略。

1　成组维修策略

为了更好地表达成组维修的思想，这里维修准备成本（setting up cost，C_{set}）指 WT 发生故障后维修设备到达现场准备维修之前的所有费用，包括维修设备的租赁费用、运输费用等。

1.1　系统定义和系统假设

若将风电场中单台 WT 视为一个整体，风电场则为一个多设备并联系统。为了更好地描述维修策略，作以下系统假设：

1）风电场中共有 N 台 WT，各 WT 之间在运行过程中相互独立，其规格和功能相同，存在较强的经济相关性。

2）单台 WT 在运行过程中的退化只和固定故障率相关，不考虑风期、风速等的影响。

3）WT 的运行状态只有正常运行和停机性故障 2 种。为了凸显维修准备成本 C_{set} 的影响，认为 WT 发生故障均为停机性故障。

4）若不考虑维修的其他影响，那么 C_{set} 对于单台 WT 故障停机和多台 WT 故障停机相同。

5）与较长的运行周期相比，成组维修时的维修时间忽略不计。

1.2　维修策略描述

根据以上系统定义和假设可知，由于维修准备成本的高昂性以及其对于单台故障 WT 和多台故障 WT 维修时的一致性，在风电场运维过程中，当单台 WT 出现停机性故障时，立即对其进行维修或者机会维修并不一定是最经济的。相反，若多台 WT 发生停机性故障导致的损失低于 C_{set}，不维修相对立即维修却是经济的。因此，当发生停机性故障的风电机组（wind turbine shutdown due to fault，WTSDF）只有 1 台时不进行维修，直到 WTSDF 数量达到 n 时才进行成组维修。维修费用主要包括维修准备费用 C_{set}、故障维修费用 C_f 以及单台 WT 单位时间的停机等待损失 L_c。

1.3　最优成组维修决策模型

成组维修的目的是降低 C_{set}，与传统维修方式相比，以成组维修时节省维修成本最大为目标建立目标函数，即成组维修时故障停机的 WT 的数量 n 使得该成组维修相较于每台 WT 故障停机立即进行维修而节省的成本（saving cost，SC）最大，可表示成如式（1）所示目标函数。

$$\begin{cases} F_{sc}(n)=F_1(n)-F_2(n) \\ \quad =n(C_{set}+C_f)-\left[(C_{set}+nC_f)+\sum_{i=1}^{n-1}L_cE(T_i)\right] \\ \quad =\left\{(n-1)C_{set}-\sum_{i=1}^{n-1}L_cE(T_i)\right\} \\ F_1(n)=n(C_{set}+C_f) \\ F_2(n)=C_{set}+nC_f+\sum_{i=1}^{n-1}L_cE(T_i) \end{cases} \tag{1}$$

式中，$F_{sc}(n)$ ——风电场成组维修节省的成本，元；$F_1(n)$ ——n 台 WT 故障停机立即进行维修的总费用，元；$F_2(n)$ ——n 台 WT 故障停机成组维修的总费用，元；C_{set} ——单次维修准备费用，元；C_f ——发生故障时的单次维修费用，元；$(C_{set}+C_f)$ ——单台 WT 故障停机立即进行维修的费用，元；L_c ——单台 WT 因故障停机不能发电导致的单位时间损失，元/a；$E(T_i)$ ——第 i 台 WT 的平均故障停机时间，d。

显然，N 台 WTSDF 成组维修时很大程度上可降低 C_{set}，同时由于 WTSDF 到达时不立即进行维修会导致停机等待损失，在 L_c 一定的情况下，停机等待损失只和

每台 WTSDF 的平均等待时间 $E(T_i)$ 有关。因此确定 $E(T_i)$ 是优化 n 台 WT 成组维修的关键。由于每台 WT 故障停机的时刻是随机的，故而每台 WT 从故障停机到恢复正常状态的等待时间不同。此外，每台 WTSDF 出现后未被立即维修可形象化为此 WTSDF 在风电场中排队，则 n 台 WT 形成成组维修时则可描述为一个队列。因此，可用排队论方法来确定第 i 台 WTSDF 的平均等待时间 $E(T_i)$。

2 WTSDF的维修排队模型

利用排队论方法建立 WTSDF 维修排队模型的关键是确定 WTSDF 的到达规律和相继到达的时间间隔分布。这里，WTSDF 视为排队论中的顾客，每台 WT 发生停机性故障视为 WTSDF 的到达，即顾客的到达。

2.1 WTSDF的到达规律

由于故障率表示的是设备瞬时故障的可能性，那么在区间 $[t, t+\Delta t)$ 内，单台 WT 发生停机性故障的概率可表示为 $\lambda\Delta t+o(\Delta t)$（其中 $o(\Delta t)$，当 $\Delta t\to 0$ 时，是关于 Δt 的高阶无穷小）。令 $P_n(t)$ 表示在时间 $(0, t]$ 内 n 台 WT 发生故障的概率，即 $(0, t]$ 内 WTSDF 的到达数为 n 的概率，则 $\sum_{n=0}^{\infty}P_n(t)=1$。若 WT 在 0 时刻是全新的，则 $P_0(0)=1$，$P_n(0)=0$。

结合实际，WTSDF 的到达符合以下 3 个条件：

1）在不重叠的时间内，WTSDF 的到来是彼此独立的，无后效性。

2）当 Δt 充分小时，在时段 $[t, t+\Delta t)$ 内有一台 WTSDF 到达（即发生故障）的概率与 t 无关，而约与区间长 Δt 成正比，即：

$$P_1(t, t+\Delta t)=\lambda\Delta t+o(\Delta t) \tag{2}$$

式中，λ ——单台 WT 的故障率，表示单位时间有一台 WTSDF 到达的概率，也称为概率强度。

3）当 Δt 充分小时，在时间区间 $[t, t+\Delta t)$ 内有 2 台或 2 台以上 WTSDF 到达的概率极小，可以忽略不计，即：

$$\sum_{n=2}^{\infty}P_n(t, t+\Delta t)=o(\Delta t) \tag{3}$$

设 $N(t)$ 表示在时间区间 $[0, t)$ 内到达的 WTSDF 数量 $(t>0)$。令 $P_n(t_1, t_2)$ 表示在时间区间 $[t_1, t_2)$（$t_2>t_2$）内有 $(n\geqslant 0)$ 台 WTSDF 的概率，即：

$$P_n(t_1, t_2)=P\{N(t_2)-N(t_1)=n\},\ t_2>t_1,\ n\geqslant 0 \tag{4}$$

显然，$P_n(t_1, t_2)$ 符合上述 3 个条件，称 WTSDF 的到达形成了泊松流，然后探索 WTSDF 到达数量 n 的概率分布。根据上述 3 个条件，可得 $P_n(0, t)=P_n(t)$，$P_0(t, t+\Delta t)=1-\lambda\Delta t+o(\Delta t)$，分别表示时间从 0 开始，在 t 时间内到达的 WTSDF 为 n 的概率和在 $[t, t+\Delta t)$ 区间内无 WTSDF 到达的概率。为求 $P_n(t)$，把区间 $[t, t+\Delta t)$ 分为互不重叠的 2 个区间 $[0, t)$ 和 $[t, t+\Delta t)$，到达的 WTSDF 总数是 n，分别出现在这 2 个区间上的情况有 3 种，如表 1 所示。

表1 概率分布

Table 1 Probability distribution

区间	$[0, t)$		$[t, t+\Delta t)$		$[0, t+\Delta t)$	
	数量	概率	数量	概率	数量	概率
（A）	n	$P_n(t)$	0	$1-\lambda\Delta t+o(\Delta t)$	n	$P_n(t)(1-\lambda\Delta t+o(\Delta t))$
（B）	$n-1$	$P_{n-1}(t)$	1	$\lambda\Delta t$	n	$P_{n-1}(t)\lambda\Delta t$
（C）	$n-2$	$P_{n-2}(t)$	2	$o(\Delta t)$	n	$o(\Delta t)$
	$n-3$	$P_{n-3}(t)$	3	$o(\Delta t)$	n	$o(\Delta t)$
	⋮	⋮	⋮	$o(\Delta t)$	⋮	$o(\Delta t)$
	0	$P_0(t)$	n	$o(\Delta t)$	n	$o(\Delta t)$

表 1 中出现的（A）、（B）、（C）3 种情况是相互独立的，且在 $[0, t+\Delta t)$ 区间内到达 n 台 WTSDF 的事件是 3 种情况之一，所以 $P_n(t+\Delta t)$ 应是 3 种情况的概率之和（各 $o(\Delta t)$ 合为一个）。

$$\begin{aligned}&P_n(t+\Delta t)\\&=P_n(t)(1-\lambda\Delta t)+P_{n-1}(t)\lambda\Delta t+o(\Delta t)\frac{P_n(t+\Delta t)-P_n(t)}{\Delta t}\\&=-\lambda P_n(t)+\lambda P_{n-1}(t)+\frac{o(\Delta t)}{\Delta t}\end{aligned} \tag{5}$$

令 $\Delta t\to 0$，结合初始条件有：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}P_n(t)}{\mathrm{d}t}=-\lambda P_n(t)+\lambda P_{n-1}(t), & n\geqslant 1\\ P_n(0)=0\end{cases} \tag{6}$$

当 $n=0$ 时符合(A)情况，得：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}P_0(t)}{\mathrm{d}t}=-\lambda P_0(t)\\ P_0(0)=1\end{cases} \tag{7}$$

求解式(6)和式(7)得：

$$P_n(t)=\frac{(\lambda t)^n}{n!}\mathrm{e}^{-\lambda t},\ \ t>0,\ \ n=0,1,2,3,\cdots \tag{8}$$

式中，$P_n(t)$ ——在区间长度为 t 的时间内到达 n 台 WTSDF 的概率，则到达数量 $\{N(t)=N(s+t)-N(t)\}$ 服从泊松分布。

2.2　WTSDF相继到达的时间间隔

由以上分析可知，1 台 WTSDF 到达所需的时间具有马尔科夫性或者无后效性，即：

$$P\{T>t+s|T>s\}=P\{T>t\} \tag{9}$$

另外，根据泊松流可知，在 $[0,t)$ 区间内至少有一台 WTSDF 到达的概率为：

$$1-P_0(t)=1-\mathrm{e}^{-\lambda t},\ \ t>0 \tag{10}$$

显然，WTSDF 相继到达的时间间隔 T 服从负指数，随机变量 T 的概率密度可表示为：

$$f_T(t)=\begin{cases}\lambda\mathrm{e}^{-\lambda t}, & t\geqslant 0\\ 0, & t<0\end{cases} \tag{11}$$

则：

$$E(T)=\frac{1}{\lambda};\ \ \mathrm{Var}(T)=\frac{1}{\lambda^2} \tag{12}$$

对于泊松流，λ 表示单位时间平均到达的 WTSDF 数量，$\dfrac{1}{\lambda}$ 则表示相继 WTSDF 到达的平均间隔时间。

由于 WT 维修活动的特殊性，单台 WT 的维修时间相对于等待时间是极小的，可以忽略不计。因此，WTSDF 成组维修的服务是批处理过程，且服务认为是瞬间完成的，服务时间为零。因此，每台待修 WTSDF 的到达时间、相继到达间隔时间均服从平稳的负指数分布，如图 1 所示。

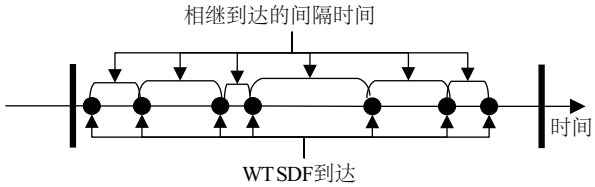


图1　间隔时间和到达时间分布

Fig. 1　Distribution of interval time and arrival time

2.3　WTSDF的排队规则

在此模型中，WT 一旦发生故障导致停机只能等待维修，再加上其无法移动，并不存在队列中 WTSDF 的转移和中途退出的现象，同时在等待维修的过程中被维修的过程是批处理过程，正在被服务的顾客数及服务时间均为零，即 $N_s=0$，$T_c=0$。

2.4　WTSDF的服务台

在风电场维修中，服务台指的是维修组或者大型维修设备等，维修的进行是单列对成批的服务。Kendall[34]提出了排队模型分类方法，并通过：1)顾客相继到达间隔时间的分布；2)服务时间的分布；3)服务台的数量等 3 个最主要的特征将模型按一定的符号进行区分，这些符号称为 Kendall 符号。一般形式为 X/Y/Z，后期扩展为 X/Y/Z/A/B/C，代表的含义如图 2 所示。

对于风电场而言，成组维修的服务规则是批处理过程，因此可看成是批处理服务(batch processing service，BPS)。在排队论中，系统中顾客的数量表示系统的状态，在本模型中，系统的状态为 n，则在时刻 t 系统状态为 n 的概率是 $P_n(t)$。这里，通过稳态解来表示，即：

$$\lim_{t\to\infty}P_n(t)=P_n(t) \tag{13}$$

那么，WTSDF 到达的模型可看成 M/D/1/n/N/BPS，即 WTSDF 相继到达的时间间隔服从负指数分布，服务时间确定为零，单服务台，系统容量为 n，顾客源数量为 N 的批处理服务的排队模型。

2.5　WTSDF的M/D/1/n/m/BPS模型求解

在排队论模型分析中，往往需要确定系统的队长、队列长、逗留时间及等待时间等各项指标。对于本模型，旨在确定每台 WTSDF 的平均故障停机时间 $E(T_i)$，即每台 WTSDF 的逗留时间期望值。因此，这里只给出确定单台 WTSDF 逗留时间的方法。由于服务方式是批处理，且维修时间忽略不计，WTSDF 的逗留时间期望值指的是单台 WTSDF 在队列中的逗留时间，也就是 WT 从故障停机状态恢复到正常运行状态的时间。令 T 表示 2 台 WTSDF 相继到来的间隔时间，从到达到离开系统的时间(即在系统中逗留的时间)，由于每台 WTSDF 的到达是随机的，显然 T 是随机变量。由式(12)知 WTSDF 相继到达的平均时间间隔为 $E(T)=1/\lambda$。

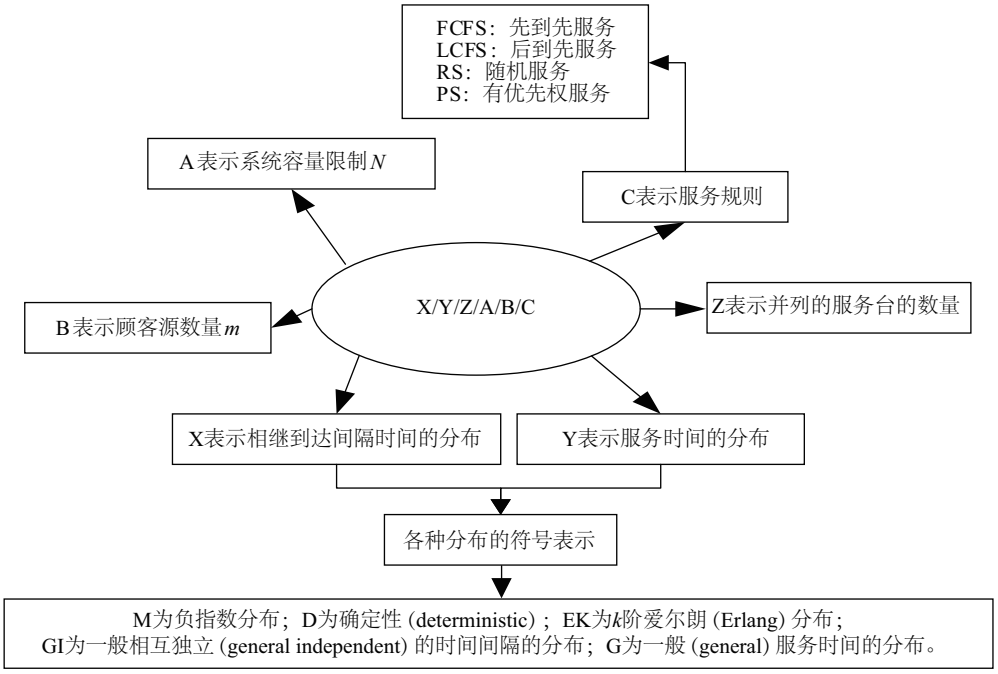


图2 排队模型的分类

Fig. 2 Classification of queuing models

当第 i 台 WTSDF 到达时，按照批处理服务的规则，在系统容量为 n 的条件下还需等待其他 $(n-i)$ 台 WTSDF 的到达，此时第 i 台 WTSDF 在系统中的逗留时间等于其他 $(n-i)$ 台 WTSDF 相继到达的时间间隔之和。

$$E(T_i)=(n-i)E(T)=(n-i)\cdot\frac{1}{\lambda} \tag{14}$$

3 优化节省成本函数

将式(14)代入式(1)，节省成本函数 F_{sc} 变为：

$$\begin{aligned}F_{sc}(n)&=(n-1)C_{set}-\sum_{i=1}^{n-1}L_cE(T_i)\\&=(n-1)C_{set}-\sum_{i=1}^{n-1}L_c\cdot(n-i)\cdot\frac{1}{\lambda}\end{aligned} \tag{15}$$

通过式(15)可确定最优成组维修 WTSDF 数量 N^*，即当风电场中 WT 故障停机的数量达到 N^* 时，进行成组维修最经济，可最大节省成本，最大值为 $\max F_{sc}$，至此节省成本函数 F_{sc} 优化完毕。

$$N^*=\arg\max(F_{sc}) \tag{16}$$

4 数值实验

利用排队论方法建立 WTSDF 的维修排队模型 M/D/1/n/N/BPS，根据此模型确定单台 WTSDF 的平均等待时间 $E(T_i)$，进而构建 WTSDF 的最优成组维修决策模型。为了验证该模型的正确性和可行性，将成组维修策略和传统维修策略对比进行数值实验。

4.1 策略对比

假设某风电场 WT 数量为 $N=25$ 台，到达率和各费用取值：$\lambda=3$，$C_{set}=100000$元，$C_f=1000$元，$L_c=51900$元/a，随着 WTSDF 数量的增加，不论采取何种维修方式，维修成本都会增加，区别在于传统维修策略下维修成本直线上升，而成组维修方式下维修成本增加趋势在开始阶段较缓，随后开始加速上升，如图 3 所示。这是因为随着 WTSDF 数量的增加，WTSDF 发生故障不能立即被维修导致的停机等待损失增加，当其超过维修准备费用 C_{set} 时，维修费用就会加速增加。在某个点上，2 种维修方式的维修成本差

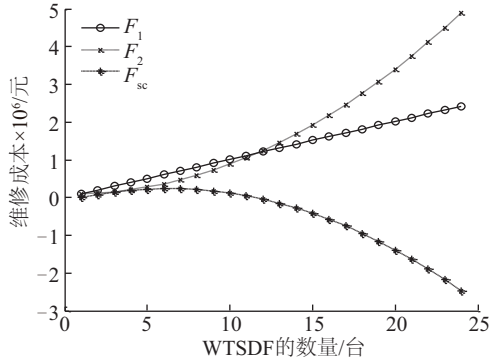


图3 不同维修策略下的维修成本

Fig. 3 Maintenance cost of different maintenance strategies

值达到最大，此时维修最为经济，对于本实验，最优成组维修的 WTSDF 数量是 $N^*=6$，此时最大节省维修成本为 $\max F_{sc}=240500$。

4.2　灵敏度分析

上述数值实验验证了模型的有效性和优越性。接下来对模型的灵敏度进行分析。由式(1)和式(15)可看出，成组维修时 WTSDF 的数量 N^* 及最大节省成本值 $\max F_{sc}$ 与 WT 的故障率 λ、维修准备费用 C_{set}、故障维修费用 C_f 单位时间停机损失 L_c 密切相关。由于到达率表示单位时间 WTSDF 到达的可能性，其值的增加意味着 WT 运行过程中退化的速度增加，则在相同时间间隔内，到达的 WTSDF 数量必然也会增加，如图 4 所示。随着到达率 λ 取值的增加，2 种维修策略对比下的最大节省成本值 $\max F_{sc}$ 不断增加，相对应的最优成组维修 WTSDF 数量也在增加，具体值见表 2。

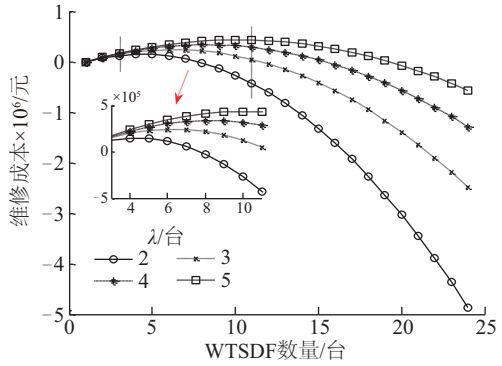


图4　不同到达率 λ 下 F_{sc} 的变化趋势

Fig. 4　Changing trend of F_{sc} under different λ

表2　λ 变化时对 $\max F_{sc}$ 和 N^* 的影响

Table 2　Effect of λ on $\max F_{sc}$ and N^*

λ/台	$\max F_{sc}$/元	N^*/台
2	144300	4
3	240500	6
4	336700	8
5	432900	10

注：$C_{set}=100000$元，$C_f=1000$元，$L_c=51900$元/a。

图 5 显示了 C_{set} 取不同值时目标函数 F_{sc} 的变化趋势。可以看出，随着 C_{set} 的增大，F_{sc} 的最大值 $\max F_{sc}$ 和最优成组维修的 WTSDF 数量 N^* 均有增加，如表 3 和图 5 中扩大子图。C_{set} 越大，成组维修时 WTSDF 数量越多，越节省维修成本。在成组维修和传统维修 2 种策略中，由于维修的 WTSDF 数量相同，对应的故障维修次数也相同，在单次故障维修费用 C_f 一致的情况下，

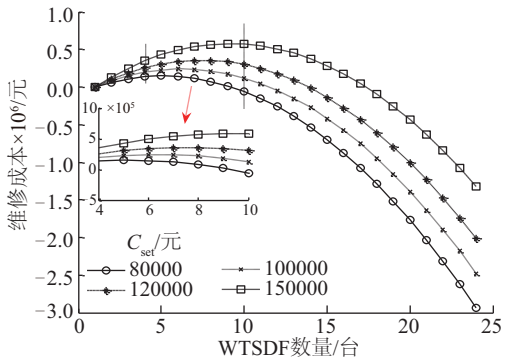


图5　不同 C_{set} 下 F_{sc} 的变化趋势

Fig. 5　Changing trend of F_{sc} under different C_{set}

表3　C_{set} 变化时对 $\max F_{sc}$ 和 N^* 的影响

Table 3　Effect of C_{set} on $\max F_{sc}$ and N^*

C_{set}/元	$\max F_{sc}$/元	N^*/台
80000	147000	5
100000	240500	6
120000	356700	7

注：$\lambda=3$台，$C_f=1000$元，$L_c=51900$元/a。

故障维修费用相同，且由式(15)可看出，节省成本函数 F_{sc} 和 C_f 无关。因此，C_f 的变化不会对最大节省成本 $\max F_{sc}$ 和最优成组维修的 WTSDF 数量 N^* 造成影响，如图 6 和表 4 所示。

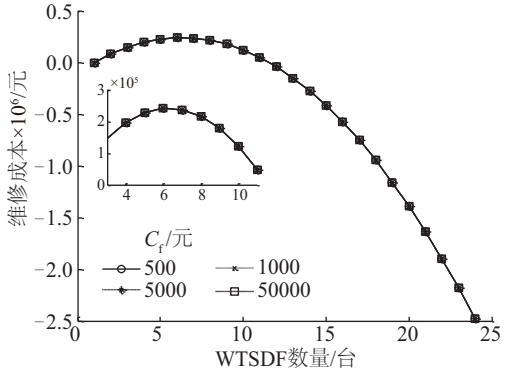


图6　不同 C_f 下 F_{sc} 的变化趋势

Fig. 6　Changing trend of F_{sc} under different C_f

表4　C_f 变化时对 $\max F_{sc}$ 和 N^* 的影响

Table 4　Effect of C_f on $\max F_{sc}$ and N^*

C_f/元	$\max F_{sc}$/元	N^*/台
500	240500	6
1000	240500	6
5000	240500	6
50000	240500	6

注：$\lambda=3$台，$C_{set}=100000$元，$L_c=51900$元/a。

图7显示了随单台WTSDF单位等待时间损失L_c节省成本函数F_{sc}呈现下降的趋势。这归因于L_f的增加导致WTSDF到达后的损失增加，节省成本必然下降，相应的最优成组维修的WTSDF数量也会下降，如表5所示。

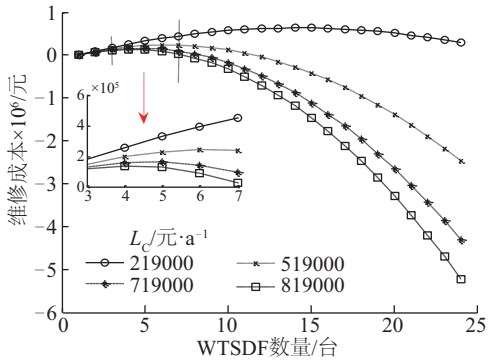


图7 不同L_c下F_{sc}的变化趋势

Fig. 7 Changing trend of F_{sc} under different L_c

表5 L_c变化时对$\max F_{sc}$和N^*的影响

Table 5 Effect of L_c on $\max F_{sc}$ and N^*

L_c/元·a^{-1}	$\max F_{sc}$/元	N^*/台
21900	635700	14
51900	240500	6
71900	160333	5
81900	136200	4

注：$\lambda=3, C_{set}=100000, C_f=1000$。

以上实验结果表明，最优成组维修时的最大节省成本值$\max F_{sc}$和WTSDF的最优数量N^*受WT到达率λ、维修准备费用C_{set}、停机等待损失L_c的影响，其中影响较大的是C_{set}和L_c，这和模型最初的分析一致，验证了模型的正确性。

5 结 论

本文将排队论和成组维修相结合，针对风电场中高昂的维修准备费用提出最优成组维修决策模型。通过数值实验分析2种策略下的维修准备成本，验证了该模型的优越性。通过灵敏度分析简述了各参数对目标函数的影响，进一步表明所构建的最优成组维修模型的正确性和可行性。通过该模型可有效降低风电场整体维修费用，提高风电场综合经济效益。

文中通过固定故障率来描述WT的退化过程，未考虑时间和状态对WT退化的影响，以及在建模中将维修时间假设为零，这是本文的不足，也是下一步的研究方向。

[参考文献]

[1] Wind Europe. The European Parliament votes for ‘at least’ 30% target for renewables in Europe [EB/OL]. https://windeurope.org/newsroom/.

[2] MÁRQUEZ F P G, TOBIAS A M, PÉREZ J M P, et al. Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods [J]. Renewable energy, 2012, 46(11): 169-178.

[3] MÁRQUEZ F P G, PÉREZ J M P, MARUGÁN A P, et al. Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time [J]. Renewable energy, 2016, 87(3): 869-883.

[4] TENG W, DING X, ZHANG Y, et al. Application of cyclic coherence function to bearing fault detection in a wind turbine generator under electromagnetic vibration [J]. Mechanical systems and signal processing, 2017, 87(3): 279-293.

[5] VAN DER LINDEN D, DE SITTER G, VERBELEN T, et al. Towards an evolvable data management system for wind turbines [J]. Computer standards & interfaces, 2017, 51(6): 87-94.

[6] NIELSEN J J, SØRENSEN J D. On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components [J]. Reliability engineering & system safety, 2011, 96(1): 218-229.

[7] 鄢盛腾. 基于机会维修模型的风电机组优化维修 [D]. 保定：华北电力大学, 2013.
YAN S T. Optimization maintenance of wind turbine based on opportunistic maintenance model [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.

[8] 杨元，黎放，侯重远，等. 基于相关性的多部件系统机会成组维修优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 827-832.
YANG Y, LI F, HOU Z Y, et al. Opportunistic group maintenance optimization of multi-unit system under dependence [J]. Computer integrated manufacturing system, 2012, 18(4): 827-832.

[9] 赵洪山，鄢盛腾，刘景青. 基于机会维修模型的风电机组优化维修 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(7): 1-5.
ZHAO H S, YAN S T, LIU J Q. Optimization maintenance of wind turbines based on opportunistic maintenance model [J]. Power system and clean energy, 2012, 28(7): 1-5.

[10] 赵洪山，鄢盛腾，张小田. 风电机组确定性机会更换维修策略的研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(4): 568-575.

ZHAO H S, YAN S T, ZHANG X T. Deterministic opportunistic replacement maintenance stratrgy for wind turbine[J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(4): 568-575.

[11] SARKER B R, FAIZ T I. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy[J]. Renewable energy, 2016, 85(1): 104-113.

[12] 符杨，许伟欣，刘璐洁，等. 基于可及度评估的海上风机机会维修策略[J]. 中国电力，2016，49(8)：74-80.
FU Y, XU W X, LIU L J, et al. An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine based on accessibility evaluation[J]. Electric power, 2016, 49(8): 74-80.

[13] 陈玉晶. 基于机会维修策略的风电机组变桨系统维修优化研究[D]. 上海：上海电机学院，2014.
CHEN Y J. Optimization maintenance research of wind turbine pitch system based on opportunistic maintenance strategy [D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2014.

[14] 陈玉晶，徐学渊，马慧民. 基于机会维修模型的风电机组变桨系统优化维修[J]. 电气自动化，2015，37(1)：61-63+80.
CHEN Y J, XU X Y, MA H M. Optimized maintenance of the wind turbine variable pitch system based on an opportunistic maintenance model[J]. Electrical automation, 2015, 37(1): 61-63+80.

[15] 张路朋. 风电机组的状态机会维修策略[D]. 保定：华北电力大学，2015.
ZHANG L P. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.

[16] 赵洪山，张路朋. 基于可靠度的风电机组预防性机会维修策略[J].中国电机工程学报，2014，34(22)：3777-3783.
ZHAO H S, ZHANG L P. Preventive opportunistic maintenance strategy for wind turbines based on reliability [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3777-3783.

[17] 赵洪山，张健平，高夺，等. 风电机组的状态－机会维修策略[J]. 中国电机工程学报， 2015，35(15)：3851-3858.
ZHAO H S, ZHANG J P, GAO D, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3851-3858.

[18] 赵洪山，程亮亮. 考虑多属性的风电机组齿轮箱状态维修策略[J]. 太阳能学报，2016，37(5)：1125—1132.
ZHAO H S, CHENG L L. Condition based maintenance strategy for gearbox of wind turbine considering multi-attibute value theory[J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(5): 1125-1132.

[19] SHAFIEE M. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: current progress and future perspectives[J]. Renewable energy, 2015, 77(5): 182-193.

[20] LI Z X, JIANG Y, GUO Q, et al. Multi-dimensional variational mode decomposition for bearing-crack detection in wind turbines with large driving-speed variations[J]. Renewable energy, 2016, 11(7): 169-179.

[21] ZHANG C, GAO W, GUO S, et al. Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance[J]. Renewable energy, 2017, 103(4): 606-612.

[22] 张琛，郭盛，高伟，等. 基于可靠度的风电机组机会维修策略[J]. 广东电力，2016，29(2)：40-44.
ZHANG C, GUO S, GAO W, et al. Opportunistic maintenance strategy for wind power generators based on reliability[J]. Guangdong electric power, 2016, 29(2): 40-44.

[23] 肖运启，王昆朋，贺贯举，等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报，2014，34(13)：2132-2139.
XIAO Y Q, WANG K P, HE G J, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.

[24] BANSAL J C, FARSWAN P. Wind farm layout using biogeography based optimization[J]. Renewable energy, 2017, 107(7): 386-402.

[25] NICOLAS K B, FERNANDO P A. Wind farm layout optimization through a crossover-elitist evolutionary algorithm performed over a high performing analytical wake model [C]// 19th EGU General Assembly, EGU2017, Proceedings from the Conference, 23-28 April, 2017, Vienna, Austria, p. 18074.

[26] PARADA L, HERRERA C, FLORES P, et al. Wind farm layout optimization using a Gaussian-based wake model[J]. Renewable energy, 2017, 107(7): 531-541.

[27] HAN B C, XUE Q H, LIU X, et al. Multi-objective optimization design of a high-speed PM machine

supported by magnetic bearings[J]. Mechanical systems and signal processing, 2017, 92(8): 349-363.
[28] MIRHASSANI S A, YARAHMADI A. Wind farm layout optimization under uncertainty[J]. Renewable energy, 2017, 107(7): 288-297.
[29] URSAVAS E. A benders decomposition approach for solving the offshore wind farm installation planning at the North Sea[J]. European journal of operational research, 2017, 258(2): 703-714.
[30] YIN P Y, WU T H, HSU P Y. Risk management of wind farm micro-siting using an enhanced genetic algorithm with simulation optimization[J]. Renewable energy, 2017, 107(7): 508-521.
[31] CHAOUACHI A, COVRIG C F, ARDELEAN M. Multi-criteria selection of offshore wind farms: case study for the Baltic States[J]. Energy policy, 2017, 103(4): 179-192.
[32] FARAJZADEH S, RAMEZANI M H, NIELSEN P, et al. Statistical modeling of the power grid from a wind farm standpoint[J]. Electric power systems research, 2017, 144(3): 150-156.
[33] GIGOVIĆ L, PAMUČAR D, BOŽANIĆ D, et al. Application of the GIS-DANP-MABAC multi-criteria model for selecting the location of wind farms: a case study of Vojvodina, Serbia[J]. Renewable energy, 2017, 103(4): 501-521.
[34] KENDALL D G. Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain[J]. The annals of mathematical statistics, 1953: 338-354.

APPLICATION OF QUEUING THEORY FOR OPTIMAL GROUP MAINTENANCE STRATEGY IN WIND FARM

Wang Jinhe[1], Zeng Jianchao[1,2]
(1. *Division of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan* 030024, *China*;
2. *School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract: Aiming at the issue of high setting-up cost of maintenance in wind farms, the optimal group maintenance strategy is researched with a single wind turbine seen as a whole unit and the wind farm as a parallel system composed of multi-units. The maintenance queuing model of the wind turbine is described by analyzing the law of downtime fault of wind turbines based on queuing theory. The average waiting time of single wind turbine after suffering from a downtime fault is determined with fixed failure rate. Comparing with traditional maintenance strategy, the optimal group maintenance model is presented by maximized the saving cost of maintenance. Finally, the correctness and availability of the proposed model is verified by numerical experiment and sensitivity analysis. The results show that the group maintenance strategy can effectively reduce the overall maintenance cost of the wind farm and realize the optimal economic efficiency of wind farms.

Keywords: wind turbine; setting up; queuing theory; maintenance; sensitivity analysis