

考虑不完全维修的风机齿轮箱优化检修策略

赵洪山, 张兴科, 郭伟

(华北电力大学电气与电子工程学院电力工程系, 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 齿轮箱是风电机组中维修费用最高的部件之一, 针对齿轮箱的状态检修策略研究对降低设备维修费用、提高可靠性具有关键作用。针对风机齿轮箱不完全维修这一现状, 提出了一种基于比例强度模型的优化检修策略。该方法利用监测到的齿轮箱振动数据、温度数据及历史维修数据建立比例强度模型, 确定齿轮箱的强度函数; 然后采用物理规划方法权衡最小维修费用和最大可靠度两个优化目标函数, 确定最优维修阈值, 并制定最优检修策略。结合实际风电场故障数据和在线监测数据, 对考虑不完全检修的优化检修策略进行仿真分析, 结果验证了所提优化策略的有效性和合理性。

关键词: 风机; 齿轮箱; 不完全维修; 状态维修; 比例强度模型; 物理规划

Optimized maintenance strategy with imperfect repair for the gearbox of wind turbine

ZHAO Hong-shan, ZHANG Xing-ke, GUO Wei

(State Key Laboratory of New Energy Power System, School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The study of condition-based maintenance strategy for the gearbox is crucial to reduce maintenance costs and improve reliability of equipment since its maintenance costs is one of the highest parts in wind turbine. In allusion to imperfect maintenance of the gearbox, an optimized maintenance strategy based on proportional intensity model (PIM) is proposed. The strategy builds the PIM based on the monitoring data about gearbox vibration, temperature and historical maintenance, and obtains the intensity function of gearbox; then the physical programming method, which is applied to deal with the tradeoff between the minimizing maintenance costs and maximizing reliability, is used to determine the optimized maintenance threshold and formulate the optimal maintenance strategy. Finally, the optimized maintenance strategy with imperfect repair is simulated by using the actual failure data and online monitoring data from wind power plant. The simulated results verify the effectiveness and rationality of the proposed maintenance strategy for gearbox.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077053 and No. 51277074).

Key words: wind turbine; gearbox; imperfect maintenance; condition based maintenance; proportional intensity model; physical programming

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)10-0015-08

0 引言

风电机组的运行环境恶劣, 如风速变化随机、外界温差变化大等, 再加之风机自身制造工艺和技术发展不完善, 这些不确定的因素导致风电机组的故障率较高, 风电场后期运行维护费用居高不下。据统计, 风电机组运行维护的费用约占整个发电成本的 25%~30%^[1]。因此, 为了降低风电机组寿命周

期内维修费用, 提高其可用性, 风电机组的维修决策管理得到了广泛关注。目前, 预防性维修和以可靠性为中心的维修广泛应用在维修决策中, 这两种维修方式存在维修不足或维修过度的问题^[2-3]; 而状态检修采用先进的状态监测和诊断技术对设备健康状况进行更加完善的评估, 制定最优的检修策略。文献[4]针对风电机组的检修策略, 对比分析了以可靠性为中心的检修和状态检修, 并结合资本寿命周期分析, 总结出合理的状态检修优于可靠性维修。随着越来越多的智能传感器被安装在风电机组上,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077053, 51277074)

监测数据获取更加便利, 这为状态检修的发展奠定了基础。

作为风电机组传动系统的关键部件, 齿轮箱的制造工艺已较为成熟, 故障率并不高, 然而一旦发生故障, 其修复过程很复杂, 造成风电机组停机时间最长^[2]。因此, 针对齿轮箱的状态检修对提高整个机组的可靠度、降低总维修费用至关重要。目前, 针对状态检修的研究日益受到关注, Jardine 等对状态检修中应用的数据处理、维修决策的模型、算法等问题做了全面的归纳总结, 并分析了未来发展趋势^[5]; Cox^[6]于 1972 年提出的时依性比例失效模型 (Proportional Hazard Model, PHM) 结合故障数据和状态监测数据, 可以在任何寿命时刻根据状态监测数据评估失效率。状态检修的模型还有隐式马尔科夫模型^[7-9]、人工神经网络算法、组合神经网络模型和蒙特卡洛算法等^[10-12]。Amulya 等将混合推理方法应用到齿轮箱的状态检修中, 综合分析运行数据中的确定性数据和不确定性数据^[13]。然而, 现有文献中的状态检修大多针对的是完全维修, 而在实际中由于风机齿轮箱完全维修的费用昂贵, 故在其寿命周期内的维修活动属于不完全维修, 即维修后设备状态处于更换新设备和维修前状态之间。针对复杂可修系统, Prentice、Williams 和 Peterson 基于随机过程理论对 Cox-PHM 的进一步扩展, 研究了针对重复失效可修系统的比例强度模型 (Proportional Intensity Model, PIM), 常称为 PWP-PIM 模型^[6]。Jiang 等^[14]研究了比例强度模型在右结尾严重度、失效类型等情况下的鲁棒性。

本文在考虑不完全维修模式下采用比例强度模型研究齿轮箱的维修策略。模型不仅考虑了风机齿轮箱的状态监测数据, 同时, 也考虑了历史故障数据、维修类型等因素的影响。首先, 利用风机齿轮箱的历史故障数据和在线监测数据建立比例强度模型; 然后, 利用物理规划方法, 权衡维修费用最小和可靠度最大两者之间的矛盾, 确定最优维修阈值, 并制定最优维修策略; 最后, 针对实际风电场故障统计数据 and 状态监测数据进行仿真分析, 结果验证了本文所提出的最优维修策略的正确性和有效性。

1 风机齿轮箱比例强度模型

1.1 风机齿轮箱的维修方式

针对风机齿轮箱这一复杂多部件可修系统而言, 在寿命期限内发生故障, 不需要对整个设备进行更换, 而仅更换或维修部分部件, 来维持所预定的功能, 故在其整个寿命期内将发生多次故障及维

修活动。根据维修类型和维修程度的不同, 维修可分为如下几种^[15-16]:

(1) 完全维修。指设备修复如新, 如齿轮箱整机更换就属于完全维修。其维修因子 $M=0$ 。

(2) 最小维修。指设备修复如旧, 如齿轮箱零部件加固、润滑油更换等属于最小维修。其维修因子 $M=1$ 。

(3) 不完全维修。指设备维修后, 功能得以恢复, 设备状态介于完全维修和最小维修之间。如齿轮箱零部件更换或维修属于不完全维修。其维修因子 $0 < M < 1$ 。

对于风机齿轮箱常见的故障, 如轮齿损坏、轴承磨损等故障类型而言, 通常仅对其部分部件进行更换或维修而不进行整机更换。故虽然其功能得以恢复, 但其健康状态通常处于“修复如新”与“修复如旧”之间, 即不完全维修 ($0 < M < 1$)。因此, 本文针对不完全维修建模研究维修活动与实际情况更加吻合。不完全维修对系统强度函数的影响如图 1 所示。

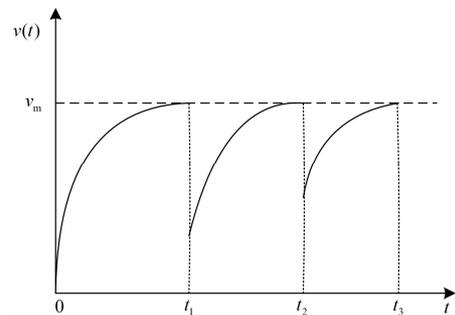


图 1 不完全维修 ($0 < M < 1$)

Fig. 1 Imperfect repair ($0 < M < 1$)

其中: $v(t)$ 为齿轮箱的强度函数; v_m 为失效临界强度值; t_1 、 t_2 、 t_3 为齿轮箱故障时刻 (假设维修时间相对设备运行时间可以忽略不计)。

1.2 比例强度模型

在 PIM 中, 每次故障事件是随机的, 故障事件通常被视为一个非齐次 Poisson 过程, 则系统发生失效的强度函数为

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{P\{N(t + \Delta t) - N(t) \geq 1 | Z(t)\}}{\Delta t} = v_0(t) \exp(\gamma^T \cdot Z(t)) \quad (1)$$

其中: t 是齿轮箱的运行时间; $v(t)$ 为齿轮箱在 t 时刻的强度函数; $v_0(t)$ 为基本强度函数; $N(t)$ 为设备在区间 $(0, t)$ 内失效次数; $Z(t)$ 是系统在时刻 t 的协变量; γ 为协变量回归参数。

比例强度模型包括全参数型和半参数型, 当失

效规律已知($v_0(t)$ 已知)时, 为全参数型PIM, 能同时估计出基本强度函数的参数和协变量的回归系数, 参数估计的准确率相对较高; 当失效规律未知($v_0(t)$ 未知)时, 采用半参数型PIM。1994年Kumar等^[17]综述了对PIM参数的各种估计方法, 以基本强度函数服从威布尔分布的PIM的估计结果最为准确。研究表明, 齿轮箱的故障时间服从威布尔分布, 其强度函数为

$$v(t) = v_0 \exp(\sum \gamma^T \cdot Z(t)) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp(\sum \gamma^T \cdot Z(t)) \quad (2)$$

其中: β 为形状参数; η 为尺度参数; $Z(t)$ 为系统在 t 时刻的协变量; γ 为协变量的回归参数。

协变量可分为外部协变量和内部协变量。外部协变量包括风机齿轮箱的运行环境温度、工作负荷等, 而内部协变量包括反映齿轮箱故障征兆的振动数据、温度数据等。考虑维修效应对强度函数的影响, 既可以将维修效应作为衰减因子得到虚拟寿命过程, 也可以将其作为协变量叠加到强度函数中, 本文采用后者。

1.3 风机齿轮箱 PIM 的参数估计

利用风机齿轮箱故障数据对PIM的参数进行极大似然估计。首先验证故障数据是否符合威布尔分布以确定模型选择的正确性, 然后构建似然函数, 并在 Matlab 中应用 Newton-Raphson 迭代算法解非线性方程组, 计算出估计值, 具体步骤如下。

第一步: 样本分布的检验。采用最常见的威布尔分布检验图, 检验图反映了威布尔分布的基本特征, 是用于检验样本数据是否符合威布尔分布规律的最直观方法。设威布尔分布的可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp(-(t/\eta)^\beta)$$

对上式两边分别求两次对数, 可得关系式

$$\ln(-\ln(R(t))) = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (3)$$

由式(3)可知, 对于风机齿轮箱故障时刻 t , 绘制 $\ln t$ 与 $\ln(-\ln(R(t)))$ 之间的函数曲线。若样本服从威布尔分布, 则该曲线应近似地拟合为一条斜率大于0的直线, 直线的斜率即为形状参数的估计值, 如图2所示, 其故障数据服从威布尔分布。

第二步: 似然函数的构造。似然函数的一般形式为

$$L(\beta, \eta, \gamma_k) = \prod_{i=1}^n f(t_i | \beta, \eta, \gamma_k)^{\delta_i} R(t_i | \beta, \eta, \gamma_k)^{1-\delta_i} = \prod_{i=1}^q f(t_i | \beta, \eta, \gamma_k) \prod_{j=1}^n R(t_j | \beta, \eta, \gamma_k) \quad (4)$$

式中: n 为样本总数; q 为观测到失效时间的样本个数; δ_i 为截尾状态量, 值为0表示截尾, 为1表示

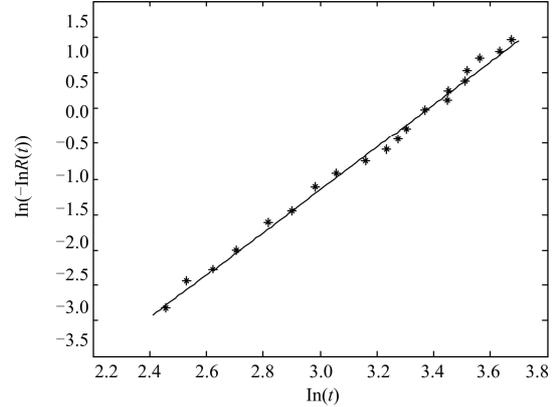


图2 威布尔分布检验图

Fig. 2 Map of the Weibull distribution test

失效; $f(t_i | \beta, \eta, \gamma_k)$ 为齿轮箱的概率密度函数; $R(t_i | \beta, \eta, \gamma_k)$ 为可靠度函数。

第三步: PIM模型参数估计。对似然函数两边求对数后, 并对 β , η , γ_k 分别求一阶偏导, 且置0。然后, 采用Newton-Raphson法进行数值计算, 求解出各参数值, 并代入模型(2), 得

$$v(t) = \frac{\hat{\beta}}{\hat{\eta}} \left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{\beta}-1} \exp(\sum \hat{\gamma}_k \cdot Z_k(t))$$

式中, $\hat{\beta}$ 、 $\hat{\eta}$ 、 $\hat{\gamma}_k$ 为 β 、 η 、 γ_k 的估计值。

2 最优维修决策

利用比例强度模型, 综合监测数据、历史故障数据及维修活动, 确定设备在运行时刻 t 的强度函数 $v(t)$ 。将强度函数与其维修阈值 v^* 进行比较以决定是否实施维修。当 t 时刻的强度 $v(t) > v^*$ 时, 进行维修; 当 $v(t) \leq v^*$ 时, 不进行维修。本文应用物理规划方法确定最优维修阈值 v^* , 具体详见下一节。

风机齿轮箱实施维修的决策条件为

$$v(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp(\sum \gamma^T \cdot Z(t)) \geq v^* \quad (5)$$

由于强度函数中指数处理复杂且不直观, 故对式(5)取对数, 进行化简整理可得到

$$\sum \gamma^T \cdot Z(t) \geq \ln(\eta^\beta v^* / \beta) - (\beta - 1) \ln(t) \quad (6)$$

式(6)描述了风机齿轮箱运行时间 t 与状态变量之间的关系。对于特定的维修阈值 v^* , 以运行时间 t 为横坐标, 以 $\ln(\eta^\beta v^* / \beta) - (\beta - 1) \ln(t)$ 为纵坐标得一条对数曲线, 即最优维修决策控制限, 以 $\ln(\eta^\beta (v^* \pm \sigma) / \beta) - (\beta - 1) \ln(t)$ 为纵坐标, 得到置信上下限。

将 t 时刻观测到的状态变量代入 $\sum \gamma^T \cdot Z(t)$ 中, 当观测点在置信下限以下时, 保持设备继续运

行；当观测点在置信上下限内，密切监视并随时进行维修；当观测点在置信上限以上时，立刻停机维修。如果 $\beta > 1$ ，维修决策图如图3所示。

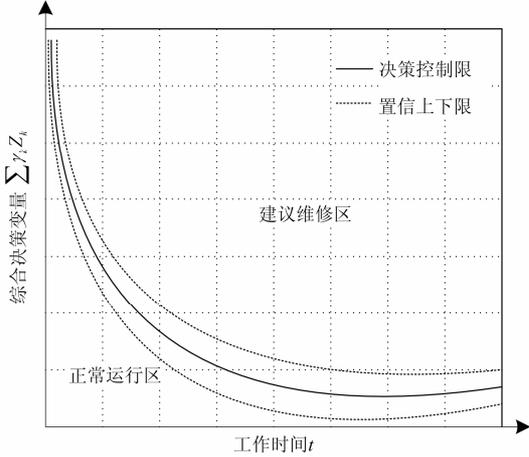


图 3 齿轮箱维修决策图

Fig. 3 Maintenance decision diagram of gearbox

3 利用物理规划优化维修阈值

状态检修通常考虑设备的最大可靠度和最小维修费用两个目标，然而两者是相互矛盾的。若想得到最大可靠度需要耗费很高的维修费用，而若想实现最小维修费用则需降低对设备可靠度的要求。我们利用物理规划方法来研究状态检修目标的优化问题^[18]，以便确定出齿轮箱基于PIM模型实施维修决策的阈值 v^* 。该方法具有迭代次数少、鲁棒性强等优点^[19]。首先分别对维修费用和可靠度构造偏好函数 f_C 、 f_R ，即对偏好进行数学量化；然后构造综合偏好函数 $F(x)$ ，建立物理规划数学模型，应用优化算法求出满足最优维修阈值 v^* 。

3.1 齿轮箱优化目标偏好函数

根据物理规划理论，分别求取维修费用和可靠度的偏好函数。

1) 维修费用函数(单位时间内平均维修成本)

$$g_C = E\left(\frac{C}{t}\right) = \frac{C_{PM} + C_{CM} \cdot N(t)}{t} \quad (7)$$

其中： C_{PM} 为预防性维修的平均成本； C_{CM} 为故障后维修的平均成本； $N(t)$ 为时间 t 内发生故障的次数。

2) 可靠度函数

$$g_R = R(t) = \exp\left(\int_0^t -v(u | Z_k) du\right) = \exp\left(\int_0^t \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{u}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(\sum \gamma_k Z_k du\right)\right) \quad (8)$$

维修费用的偏好函数属于1S型，即费用越低越

好，而可靠度的偏好函数属于2S型，即可靠度越高越好^[18]。如图4、图5所示，横坐标中的(g_{C1} 、 g_{C2} 、 g_{C3} 、 g_{C4} 、 g_{C5})与(g_{R1} 、 g_{R2} 、 g_{R3} 、 g_{R4} 、 g_{R5})表示一系列偏好区间的边界值。纵坐标 f_C 、 f_R 表示维修费用和可靠度的偏好函数值。利用物理规划方法确定维修阈值的另一优点是可以根据实际情况灵活修改偏好区间边界值，重新优化维修决策阈值。

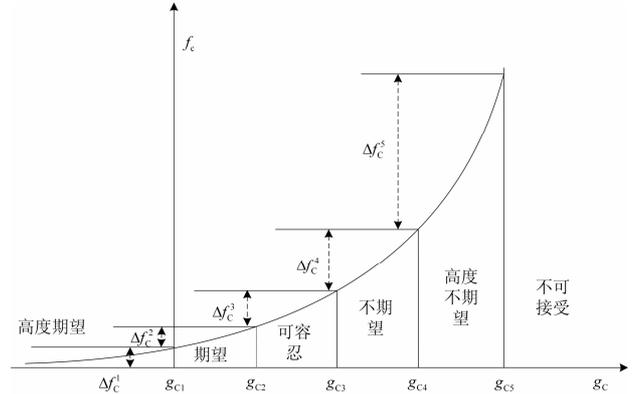


图 4 维修费用偏好函数(1S)

Fig. 4 Preference function of maintenance costs (1S)

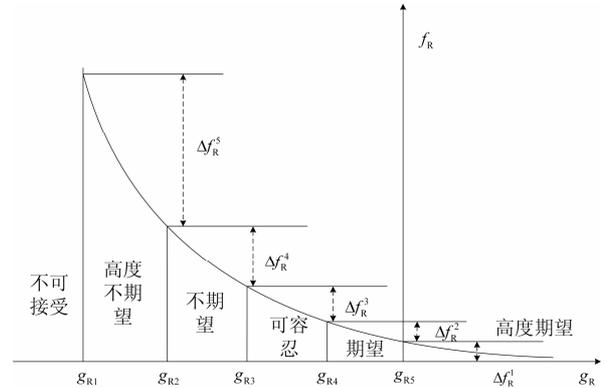


图 5 可靠度偏好函数(2S)

Fig. 5 Preference function of reliability (2S)

针对维修费用 g_C 计算偏好函数，如图4所示，将偏好区域分为高度期望、期望、可容忍、不期望、高度不期望、不可接受6个区域。对于区域(0, g_{C1})，偏好函数用指数函数形式表达为

$$f_C = f_C^1 \exp\left[\frac{S_{C1}}{g_{C1}}(g_C - g_{C1})\right] \quad (9)$$

对于区域(g_{C1} , g_{C2})、(g_{C2} , g_{C3})、(g_{C3} , g_{C4})、(g_{C4} , g_{C5})用分段样条的形式表达为

$$f_C^k(g_C) = A_C^k g_C^4 + B_C^k g_C^3 + C_C^k g_C^2 + D_C^k g_C + E_C^k \quad (10)$$

式中： g_C 为维修费用； A_C^k ， B_C^k ， C_C^k ， D_C^k ， E_C^k 为在各区域的常数系数。

同理, 可得可靠度 g_R 的偏好函数, 如图5所示。

对于区域 (g_{R1}, g_{R2}) 、 (g_{R2}, g_{R3}) 、 (g_{R3}, g_{R4}) 、 (g_{R4}, g_{R5}) 用分段样条的形式表达为

$$f_R^k(g_R) = A_R^k g_R^4 + B_R^k g_R^3 + C_R^k g_R^2 + D_R^k g_R + E_R^k \quad (11)$$

式中: g_R 为可靠度; A_R^k , B_R^k , C_R^k , D_R^k , E_R^k 为各区域的常数系数。

对于区域 $(g_{R5}, 1)$, 偏好函数用指数函数形式表达为

$$f_R = f_R^5 \exp\left[\frac{g_{R5}}{g_{R5}}(g_R - g_{R5})\right] \quad (12)$$

3.2 最优维修阈值的确定

综合维修费用偏好函数 f_C 和可靠度偏好函数 f_R 构造综合偏好函数 $F(x)$ 作为物理规划模型的目标函数, 优化模型为

$$\min F(x) = \log\{0.5[f_C(g_C(x)) + f_R(g_R(x))]\} \quad (13)$$

s.t.

$$0 \leq g_C(x) \leq g_{C5} \quad (14)$$

$$g_{R5} \leq g_R(x) \leq 1 \quad (15)$$

$$x_m \leq x \leq x_M \quad (16)$$

其中: $x = [t, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4]$, 式(14)为维修费用的约束条件; 式(15)为可靠度的约束条件; 式(16)为自变

量 x 的约束条件。

根据式(9)~式(12)构造维修费用和可靠度偏好函数 f_C 、 f_R , 计算出偏好函数的系数, 然后, 构造综合偏好函数 $F(x)$ 作为目标函数, 采用优化算法对模型优化求解, 得到最优解 x^* , 将其代入式(2)求得最优维修阈值 v^* 。可求得对应的维修费用 $g_C(x^*)$ 和可靠度 $g_R(x^*)$, 并通过观察其所在的区域, 来判定最优解是否合理。该方法可根据实际需求, 更改维修费用或可靠度的偏好边界, 即提高或降低对风机齿轮箱可靠度的要求, 增加或减少维修费用的投入, 来重新优化最优解, 实现其应用的灵活性。

4 仿真分析

4.1 风力发电机齿轮箱数据收集

建立风机齿轮箱的维修决策模型并估计模型中的参数, 需要风机齿轮箱的历史故障数据、维修次数、维修类型以及状态监测数据。某型风机齿轮箱 2004~2010 年间的部分数据样本如表 1 所示。经分析, 维修因子 M 、维修次数、振动加速度、温度相互独立, 故将其分别定义为协变量 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 。

表 1 风机齿轮箱主要监测数据的部分样本

Table 1 Part sample of the main monitoring data from wind turbine gearbox

故障时刻	装机时间/h	δ	M	维修次数	振动加速度/(mm/s ²)	温度/°C
2004-3-2	1 707	0	0.5	1	167	50
2004-5-11	3 331	1	0.2	0	175	68
2005-6-18	4 515	1	0.5	0	160	69
2005-9-2	7 801	0	0.2	2	172	55
2006-4-20	7 095	1	0.1	0	166	70
2007-5-26	5 595	1	0.4	0	172	52
2009-6-19	4 055	1	0.1	0	177	65
2010-5-18	3 832	1	0.3	1	166	82

注: 其中 “ δ ” 表示该齿轮箱监测数据是否截尾的状态指示量(0 表示截尾数据, 1 表示失效寿命数据);

“ M ” 是维修因子($0 \leq M \leq 1$), 指每次修理后系统得以改善的程度。

4.2 比例强度模型参数估计及维修阈值优化

对表1中的故障时装机时间做威布尔分布检验图, 如图2所示, 可知风机齿轮箱故障时间符合威布尔分布, 故对该风机齿轮箱进行建模时, 可采用威布尔比例强度模型。

根据表1中的数据, 采用极大似然估计法, 应用 Matlab 编程, 算出各参数为: $\beta = 4.242$, $\eta = 4921.7$, $\gamma = [-3.022, 2.084, 0.031, 0.059]$, 可得到强度函数表达式为

$$v(t) = \frac{4.242}{4921.7} \left(\frac{t}{4921.7}\right)^{3.242}.$$

$\exp(-3.022Z_1(t) + 2.084Z_2(t) + 0.031Z_3(t) + 0.059Z_4(t))$
式中: $Z_1(t)$ 为齿轮箱维修因子; $Z_2(t)$ 为齿轮箱的维修次数; $Z_3(t)$ 为齿轮箱的监测振动数据; $Z_4(t)$ 为齿轮箱的监测温度数据。

然后, 利用物理规划方法优化出维修阈值, 具体如下。根据文献[20], 风机齿轮箱的预防性维修费用 C_{PM} 、故障后维修费用 C_{CM} 分别为 \$38 000、\$152 000。将齿轮箱比例强度模型中的参数估计值

$[\hat{\beta}, \hat{\eta}, \hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3, \hat{\gamma}_4]$ 代入式(7)、式(8)即可得到目标优化函数单位时间平均维修费用 g_C 、可靠度 g_R 的表达式。

根据实际偏好情况，分别设定维修费用和可靠度的偏好区间边界值(g_{C1} 、 g_{C2} 、 g_{C3} 、 g_{C4} 、 g_{C5})、(g_{R1} 、 g_{R2} 、 g_{R3} 、 g_{R4} 、 g_{R5})。应用式(9)~式(12)计算偏好函数 f_C 、 f_R ，偏好函数图形如图6、图7所示。

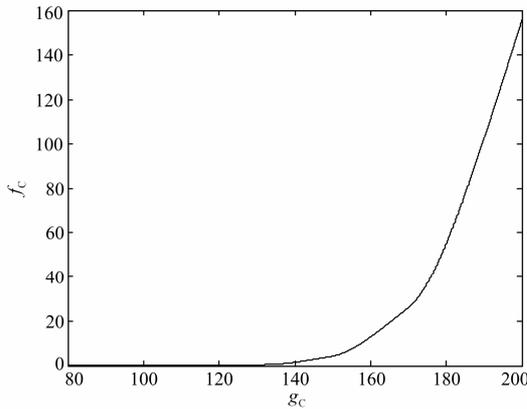


图6 维修费用偏好函数仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of preference function for maintenance costs

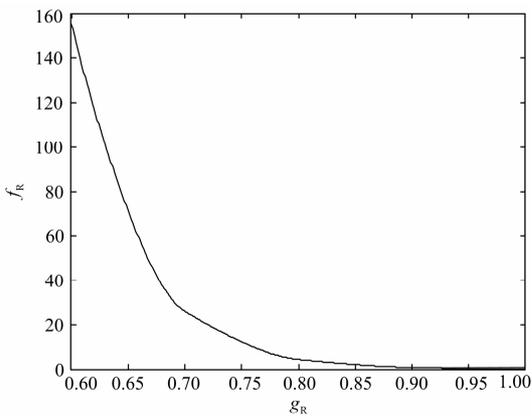


图7 齿轮箱可靠度偏好函数仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of preference function for reliability

综合维修费用偏好函数和可靠度偏好函数构造综合偏好函数 $F(x)$ 作为物理规划优化目标，根据式(13)~式(16)，使用优化算法求出最优解为

$$x = (386, 0.778, 0, 175, 92)$$

对应的维修费用 $g_C = 134.7147$ 、可靠度 $g_R = 0.9120$ 。经分析知，如表2所示，所求最优解使维修费用、可靠度均落在期望区域内，此优化结果可以接受。最终确定出最优维修决策阈值 $v^* = 0.0011$ 。

表2 偏好区间分析(▼表示偏好函数值所在区域)
Table 2 Analyses of the preference region (▼ means the area of preference value)

优化目标	偏好类型	高度期望	期望	可容忍	不期望	高度不期望	不可接受
g_C	1S	125	▼135	150	170	200	200+
g_R	2S	0.99	▼0.9	0.8	0.7	0.6	0.6-

由于物理规划方法的灵活性，在实际应用中，当对风机齿轮箱维修费用和可靠度的要求发生变化时，即偏好区间边界值变化时，可应用物理规划方法重新确定出最优维修决策阈值。

4.3 维修决策

采用上述物理规划，计算出最优维修阈值 v^* ，经仿真计算可得到维修决策优化控制限曲线如图8所示，实线为优化得到的控制限，虚线为其维修决策置信下限，点划线为维修决策置信上限。选取某型号风机齿轮箱在2008~2012年间的运行监测数据，应用维修决策图决定是否采取维修。将监测到的振动数据、温度数据和历史维修次数、维修因子四个协变量经过回归系数的加权后在决策图中画点。如图8所示，当齿轮箱正常运行时，所描的点在曲线下方小范围内波动；当齿轮箱即将发生故障时，所描的点在虚线上方，需立即采取维修。

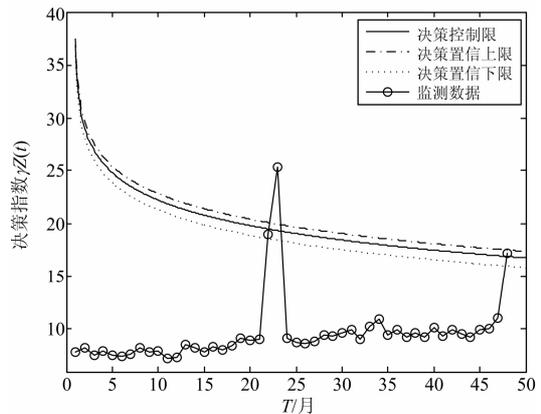


图8 维修决策仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of maintenance decision

5 结论

1) 将不完全维修这一现状考虑到状态维修策略中，提出了基于比例强度模型的优化检修策略。该策略不仅反映了历史故障数据及在线监测数据对齿轮箱健康状况评估的影响，同时考虑了不完全维

修的影响。

2) 为了权衡维修费用和可靠度之间的矛盾关系, 采用物理规划方法优化出合理的维修阈值。在实际应用中该方法可以根据对目标函数要求不同而重新优化维修阈值, 应用更加灵活方便。

3) 结合某一风电场的运行监测数据进行仿真分析, 结果验证了此优化检修策略的有效性和实用性, 为检修人员决策是否实施检修提供了更加准确的判定依据, 并为解决状态检修问题提供了一种新的研究思路。

参考文献

- [1] MÀRQUEZ F, TOBIAS A, PÉREZ J, et al. Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods[J]. *Renewable Energy*, 2012, 46: 169-178.
- [2] 杭俊, 张建忠, 程明, 等. 风力发电系统状态监测和故障诊断技术综述[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(4): 261-271.
HANG Jun, ZHANG Jian-zhong, CHENG Ming, et al. An overview of condition monitoring and fault diagnostic for wind energy conversion system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(4): 261-271.
- [3] 王佳明, 刘文颖, 魏帆, 等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(5): 77-80.
WANG Jia-ming, LIU Wen-ying, WEI Fan, et al. Study on policies of condition based maintenance of transmission and distribution equipments combined with life cycle cost management[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(5): 77-80.
- [4] ANDRAWUS J, WATSON J, KISHK M, et al. The selection of a suitable maintenance strategy for wind turbines[J]. *Wind Engineering*, 2006, 30(6): 471-486.
- [5] JARDINE A, LIN D, BANJEVIC D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(7): 1483-1510.
- [6] 张继权. 基于比例强度模型的风电机组优化检修策略研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
ZHANG Ji-quan. Optimized maintenance decision of wind turbine-generator system based on proportional intensity model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [7] 何金定, 贺星棋. 考虑可修多状态的输电线路可靠性评估模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(4): 11-14.
HE Jin-ding, HE Xing-qi. Evaluation model of reliability for overhead transmission line with considerations of repairable multi-state[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(4): 11-14.
- [8] 李明, 韩学山, 王勇, 等. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 196-202.
LI Ming, HAN Xue-shan, WANG Yong, et al. Decision-making model and solution of condition-based maintenance for substation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 196-202.
- [9] 庄哲民, 殷国华, 李芬兰, 等. 基于小波神经网络的风力发电机故障诊断[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(4): 224-228.
ZHUANG Zhe-min, YIN Guo-hua, LI Fen-lan, et al. Fault diagnosis of wind power generation based on wavelet neural network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(4): 224-228.
- [10] 何恰刚, 祝文姬, 周炎涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(6): 163-171.
HE Yi-gang, ZHU Wen-ji, ZHOU Yan-tao, et al. An analog circuit diagnosis method based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(6): 163-171.
- [11] 刘文霞, 蒋程, 张建华, 等. 一种用于序贯蒙特卡罗仿真的风电机组多状态可靠性模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(8): 73-80.
LIU Wen-xia, JIANG Cheng, ZHANG Jian-hua, et al. A multistage reliability model of wind turbines for sequential Monte Carlo simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(8): 73-80.
- [12] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(5): 13-20.
- [13] AMULYA K, KATHERINE T, ROBERT L, et al. Hybrid reasoning for prognostic learning in CBM systems[C] // *Aerospace Conference, IEEE Proceedings, Big Sky, MT, Mar 10-17, 2001*, 6: 2957-2969.
- [14] JIANG S T, LANDERS T L, RHOADS T R. Assessment of repairable-system reliability using proportional

- intensity models: a review[J]. IEEE Trans on Reliability, 2006, 55(2): 328-336.
- [15] 张海军. 民航发动机性能评估方法与视情维修决策模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
ZHANG Hai-jun. Research on methods of performance synthetic estimation and CBM decision-making models for aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [16] 王一, 王慧芳, 张亮, 等. 基于效用和成本的状态检修维修方式选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 39-45.
WANG Yi, WANG Hui-fang, ZHANG Liang, et al. Research on maintenance type selection with CBM technology based on effectiveness and cost analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 39-45.
- [17] KUMAR D, KLEFSJO B. Proportional hazards model: a review[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 44: 177-188.
- [18] 董书革, 饶绮麟. 基于偏好设计的物理规划理论[J]. 北京科技大学学报, 2009, 32(2): 250-255.
DONG Shu-ge, RAO Qi-lin. Physical programming theory based on preference design[J]. Journal of University of Science and Technology, 2009, 32(2): 250-255.
- [19] 刘莉, 邢超, 龙腾. 基于物理规划的弹道多目标优化[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(4): 357-362.
LIU Li, XING Chao, LONG Teng. Study of multi-objective trajectory optimization based on physical programming[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(4): 357-362.
- [20] FINGERSH L, HAND M, LAXSON A. Wind turbine design cost and scaling model[M]. America: National Renewable Energy Laboratory, 2006.

收稿日期: 2013-08-06; 修回日期: 2013-09-03

作者简介:

赵洪山(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、运行与控制, 电力设备故障预测与优化检修;

张兴科(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为风力发电机组优化检修研究; E-mail: xkzhang757@126.com

郭伟(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电机组故障预测。