

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.014

考虑人为因素的电气设备混合检修策略研究^{*}

文东山¹, 焦 昊¹, 暴英凯¹, 郭创新^{1*}, 朱炳全², 徐立中²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要:针对目前电力设备检修模型中很少考虑人为因素影响,且通常都只研究单一检修模式下的检修周期优化问题导致现有检修策略考虑影响因素不全面的情况,对电力设备检修过程中的人为影响因素进行了研究归纳,并提出了一种基于时间延迟理论的电力设备状态检修与计划检修混合检修模型,并在设备状态检测和设备检修过程中充分考虑了人为因素的影响;同时通过优化状态检修和计划检修的检修周期使单位时间检修成本达到最小。研究结果表明,混合检修模式下选择合理的状态检修周期和计划检修周期相比于单一状态检修模式下能够降低单位时间平均检修成本、提高检修效率;同时也说明,在设备状态检测及检修过程中充分考虑人为失误等因素的影响对优化检修周期有很积极的作用。

关键词:人为因素;混合检修策略;检修周期;检修成本;时间延迟模型

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1103-06

Hybrid maintenance strategy of electric equipment incorporating human factor

WEN Dong-shan¹, JIAO Hao¹, BAO Ying-kai¹, GUO Chuang-xin¹, ZHU Bing-quan², XU Li-zhong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Aiming at the problem that human error was rarely considered in electrical equipment maintenance so far, and what be usually studied was optimization problems under single maintenance mode. Human factors in electrical equipment's maintenance process were studied, and then a hybrid model of condition based maintenance and periodic maintenance based on delay-time-based model incorporating human factors in condition detection and maintenance was established. Then the cycles of both maintenance methods were optimized to minimize the cost per unit time. The results indicate that choosing reasonable cycles could minimize the cost per unit time of equipment maintenance and improve maintenance efficiency compared to condition based maintenance alone. What also demonstrated by the result is considering human errors in condition detection and maintenance of equipment has very positive effect to optimize the maintenance cycles.

Key words: human error; hybrid maintenance strategy; maintenance cycle; maintenance cost; delay time based model

0 引 言

设备检修对确保设备安全运行、增强供电可靠性和电力系统的整体稳定性具有重要作用^[1]。电网设备检修管理方式大致经历了3个发展阶段,上世纪50年代以前,检修方式基本上是事后检修,缺点是故障后果损失很

大^[2]。60~70年代,逐步形成了以计划检修为主的预防维修方式,提高了设备检修效率,但同时也带来检修冗余和检修不足的问题^[3]。80年代以来,对设备的相应状态指标进行定期检测、评估健康状态,并在设备发生实质性故障之前进行维修的状态检修开始发展起来^[4-7]。

在改进电网设备现行的检修方式、选择合理的检

收稿日期:2016-05-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51537010);国家高技术研究发展计划(“863计划”)资助项目(2015AA050204)

作者简介:文东山(1990-),男,湖北恩施人,主要从事电力系统运行风险评估与电力系统人为操作可靠性方面的研究。E-mail:1131545701@qq.com

通信联系人:郭创新,男,教授,博士生导师。E-mail:guochuangxin@zju.edu.cn

修策略时,应该分析各种维修方式的具体内容,结合设备的特点和需要,使用不同的检修方式^[9]。对于某些设备状态无法用现有技术及时进行状态检测和诊断以及故障的发生与运行时间有比较确定关系的情况^[10],可以采用定期计划检修;对于某些设备故障既不和时间有比较明确的关系,同时故障后果相对不是很严重的,可以实施故障后检修方式。对于一些重要的主机和故障频率比较高的元件,可同时采用状态检修和定期计划检修两种方式。

影响电力设备检修的因素有很多,在以往关于电网设备检修的研究中,除了考虑检修策略和技术手段^[11],很少有考虑人为因素对设备检修可靠性的影响。在大多数研究中,分析者假设设备经过检修后恢复到刚投运的状态,实际中并非这样^[12]。文献[13]介绍了几种检修过程不完美的情况,并讨论了相应检修策略优化问题。文献[14]分析了由于人为失误等因素造成的设备缺陷。文献[15]提出了考虑人为因素关于设备可靠度的定检周期决策,分析了定期检修中人为因素对提高设备可用率的影响。但是以上研究都是针对单一检修模式以及只是部分考虑了人为因素影响。

在上述背景下,本研究提出一种在计算模型中引入时间延迟理论模型,并全面考虑人为因素的电气设备状态检修和计划检修的混合策略。

1 设备状态检修的时延模型基本原理

时间延迟理论认为^[15],设备故障的形成主要经历产生设备缺陷和缺陷进一步发展成功能故障两个过程。这两个过程是互相独立的。把设备的运行情况分为“正常”、“缺陷”和“故障”3 个离散状态。从缺陷到功能故障的间隔时间称为 $P-F$ 间隔,状态检修等预防维修就是在 $P-F$ 间隔内进行,设备故障的 $P-F$ 间隔期模型如图 1 所示^[16]。

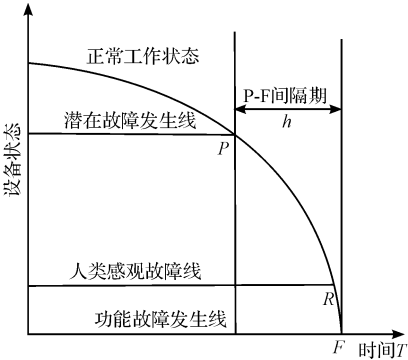


图 1 设备故障的 $P-F$ 间隔期模型

时间延迟记为 h , h 是随机变量,其分布函数为 $f(h)$ 。每个检测周期内发生缺陷及功能性故障示意图

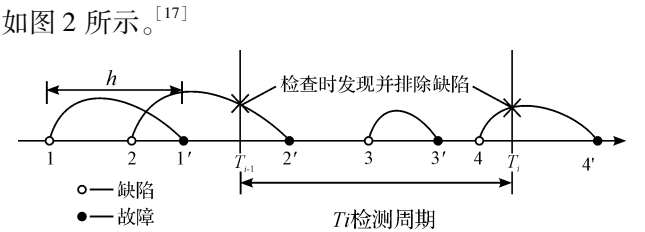


图 2 状态检测周期内发生的故障次数及观察到的缺陷数
在状态检修周期内,缺陷不发展成功能性故障的可靠性函数如下:

$$R(x) = \int_x^\infty f(h) dh \tag{1}$$

故障率函数为:
$$F(x) = 1 - R(x) \tag{2}$$

设备的缺陷率服从与时间相关的函数 $\lambda(t)$ 。在不考虑人为失误概率的情况下每个状态检测周期发生并检测出的潜在故障数由 $K_1(T)$ 表示:

$$K_1(T) = \int_0^T R(T-t)\lambda(t) dt \tag{3}$$

2 人为因素对设备状态检修的影响

2.1 状态检测中的人为因素影响

在状态检测中很多地方涉及到人为因素,例如在进行历史数据统计整理估计模型的参数,以及通过状态检测及相应试验获得设备当前状态的数据的过程中会受到设备因素和人为因素的共同影响。目前已有多种人为可靠性分析方法对人为因素进行量化分析^[19]。这里假设设备已经发生的缺陷在检测点被检测出来的概率为 p ,人因失误概率为 Hep ,二者之和为 1。

2.2 人为因素导致的不完美检修

设备检修质量是指设备检修后达到预期技术要求的程度,随着检修技术的进步,人为因素对检修质量的影响越来越明显。人为因素包括多个方面,在设备检修过程中,检修人员的技术水平、专业技能、工作态度及精神状态等因素都会影响到检修的质量,如表 1 所示。

表 1 影响设备检修的人为因素

人为因素	具体描述
技术经验	如果检修人员技术经验不足,便不能将自己的想法落到实处,不能高质量的完成检修工作。
专业技能	检修工作人员只有具备了相应的专业技能,才能发现设备存在的问题,对问题进行专业分析、判断,进而解决问题。
工作态度	工作态度是影响检修质量的主观人为因素,如果检修人员工作不专心,很容易出现检修质量问题。
精神状态	良好的精神状态是检修工作顺利进行的保证,如果检修人员精神状态不佳,不仅做不好检修工作,还可能带来人身安全伤害。

设备按照检修质量的好坏,检修结果可分为5类:检修故障、状态恶化、状态不变、状态改善和完美检修。本研究为了考虑人为因素对检修的影响,主要考虑完美检修 PM(Perfect Maintenance),检修后状态不变 ABAO(As Bad As Old)和检修后故障 MB(Maintenance Breakdown)3种情况,分别对应概率 P_{PM} 、 P_{ABAO} 、 P_{MB} ,服从约束:

$$P_{PM} + P_{ABAO} + P_{MB} = 1 \quad (4)$$

则检修中的人为失误概率表示为^[14]:

$$1 - P_{PM} = 1 - (1 - Hep_1)(1 - Hep_2) \times (1 - Hep_3)(1 - Hep_4) \quad (5)$$

式中: $Hep_1, Hep_2, Hep_3, Hep_4$ —技术经验、专业技能、工作态度和精神状态对应的人为失误率。

3 考虑人为因素的设备混合检修模型

相比于设备刚开始投运时,每一次状态检修时设备故障率都会有所增加。

设备混合检修模型如图3所示。

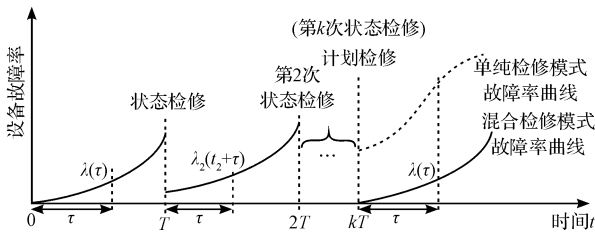


图3 设备混合检修模型

虚线表示在单纯状态检修模式下,到第 k 次检修时,设备故障率已经累积到很大,由于不能无限增大,后半段故障率随时间增长变缓;实线表示在混合检修模式下,基于文章后面的假设,每一次计划检修后,设备故障率都恢复到刚投运时的水平。

假设每个状态检修周期 T (天)内平均检测费用成本为 C_i (千元);检测出缺陷并修复的平均费用成本为 C_r (千元);缺陷发展成功能性故障的平均修复费用成本为 C_b (千元);每次大检修 T_n (天)平均费用成本为 C_n (千元)。以上费用成本都包括由于停机造成的削减负荷损失和补贴等费用。每个计划检修周期内状态检修周期个数 N_n 。每个状态检修周期内发生缺陷个数期望值为 N_T 。

为了突出研究问题的实质,排除无关干扰,在分析之前,对有关条件作如下假设:

(1) 状态检测、缺陷修复及故障修复时间都远小于周期 T ;

(2) 所有的故障后检修为完美检修;

(3) 缺陷检修后 ABAO 的情况,一定会在下一个周期发展成故障或者被检测出缺陷并进行完美检修;

(4) 每一个状态检修周期 T ,系统并不能得到完美的更新。并且随着时间的积累设备的故障率会不断增加。本研究采取的方法是对优化目标函数用一个与计划检修周期 T_n 相关的参数进行模拟;

(5) 每一次周期性检修(周期为 T_n)能彻底修复本周期的所有缺陷及故障。

3.1 状态检修周期对单位时间维修成本的影响

在单一状态检修模式下,笔者按照2.1的假设考虑状态检测中的人为失误概率,即发生的缺陷在检测点以 p 的概率被检测出来,状态检修周期 T 对单位时间维修成本的影响。

(1) 在状态检修周期 T 内的时刻 t 发生的某个缺陷在随后第一个检测周期内被检测出来的概率为 $pR(T-t)$,在 N_n 之前被检测出来的概率为:

$$P_i = \sum_{n=1}^{N_n} p(1-p)^{n-1} R(nT-t) \quad (6)$$

式中: p —状态检测失误概率; R —缺陷不发展成功能性故障的可靠性函数,且 $0 < t < T, N_n = \lceil T_n/T \rceil$ 。

(2) 每个状态检测周期发生并检测出的缺陷个数为:

$$K_1(T) = \int_0^T \sum_{n=1}^{N_n} p(1-p)^{n-1} R(nT-t) g(t) dt \quad (7)$$

式中: $g(t)$ —断路器缺陷率, $0 < t < T$ 。

(3) 当 $(1-p)^2 \ll 1$ 时,把 $n \geq 3$ 部分舍弃得:

$$K_1(T) = \int_0^T pR(T-t)g(t)dt + \int_0^T p(1-p)R(2T-t)g(t)dt \quad (8)$$

其中,令变量:

$$K_{11}(T) = \int_0^T pR(T-t)g(t)dt \quad (9)$$

$$K_{12}(T) = \int_0^T p(1-p)R(2T-t)g(t)dt \quad (10)$$

(4) 本周期内检测出的缺陷以及本周期缺陷检修后 ABAO 的情况,在接下来的一个周期内被检测出来并被完美检修的缺陷个数之和为:

$$K_2(T) = K_1(T) + K'_{11}(T) + K'_{12}(T) \quad (11)$$

其中,本周期内发生的缺陷在本周期检修后状态不变的个数为:

$$K'_{11}(T) = K_{11}(T)P_{ABAO} \int_0^T \sum_{n=1}^1 p(1-p)^{n-1} \times R[(n+1)T-t]g(t)/N_T dt \quad (12)$$

式中: P_{ABAO} —检修后状态不变的概率, $N_T = E(\lambda)$ 。

第一个周期内发生的缺陷在本周期内检修后状态不变,并在下一个周期被检测出来的缺陷个数:

$$K'_{12}(T) = K_{12}(T)P_{ABAO} \int_0^T \sum_{n=1}^2 p(1-p)^{n-1} \times R[(n+2)T-t]g(t)/N_T dt \quad (13)$$

(5) 每个周期内发生的缺陷没被检测出并发展成故障的个数为:

$$B_1(T) = N_T - K_1(T) \quad (14)$$

(6) 本周期内缺陷在检修之前发展成功能性故障的个数及不完美检修中的检修后故障个数之和为:

$$B_2(T) = B_1(T) + K_1(T)P_{MB} \quad (15)$$

式中: P_{MB} —检修后故障的概率。

(7) 每周期内单位时间检修成本为:

$$C(T) = [C_i + C_r K_2(T) + C_b B_2(T)]/T \quad (16)$$

式中: C_i —状态检修周期 T 内平均检测费用成本, C_r —检测出缺陷并修复的平均费用成本, C_b —缺陷发展成功能性故障的平均修复费用成本。

分析状态检修周期 T 对单位时间检修成本的影响规律可知,目标函数 $C(T)$ 先减后增,一定会在中间有唯一的最小值。

3.2 考虑人为因素的设备状态检修和计划检修混合模型

在分析状态检修和计划检修混合模型时,先考虑状态检修周期 T 固定时,计划检修周期 T_n 对单位时间检修成本的影响。分析结果,随 T_n 增加,目标函数在中间有唯一的极小值然后再以 T 和 T_n 为变量,联合优化,分析目标函数随 T 和 T_n 变化的规律,并在目标函数最优的情况下找到相应的最优解。基于第三节中的假设(4),随时间 T_n 的累计,设备故障率逐渐增加。这里作如下模拟,模拟参数为 $C_A(T_n)$,改进后的目标函数为:

$$C_m(T_n) = \{N_n[C_i + C_r K_2(T) + C_b B_2(T)] + C_n\} / (T_n + C_A(T_n)) \quad (17)$$

式中: C_n —每次大检修 T_n 内平均费用成本。

4 算例分析

本研究以实际电力系统中某线路断路器的检修场景为前提,引入状态检修的时间延迟模型。本研究对相关参数进行了合理的假设。

4.1 状态检测周期对单位时间检修成本的影响

以往的很多文献都是设定元件缺陷率为一个恒定的常数^[20],这与实际不尽相符。本研究在常数基础上叠加一个随时间变化的指数变量。

假设该断路器缺陷率随时间的分布为:

$$g(t) = c + ae^{-bt} (t \geq 0) \quad (18)$$

式中: $c = 0.1, a = -0.06, b = 0.1$

时延模型中设备缺陷有发生时间点到发展成故障的延迟时间概率分布函数为:

$$f(h) = ke^{-kh} (h \geq 0) \quad (19)$$

式中: $k = 0.01$ 。

已经发生的缺陷检测时的人为失误概率 $Hep = 0.1$,检测出缺陷的概率:

$$p = 1 - Hep \quad (20)$$

式中: C_i —每个周期 T 内检测费用成本, $C_i = 10$ 单位; C_r —检测出缺陷并修复或者更换的费用成本, $C_r = 20$ 单位; C_b —缺陷发展成故障后的修复费用成本, $C_b = 100$ 单位; C_n —每次大检修 T_n 费用成本, $C_n = 50$ 单位。 $P_{PM} = 0.7, P_{ABAO} = 0.2, P_{MB} = 0.1$ —检修中的完美检修、检修后状态不变和检修后故障的概率。

将式(18,19)代入式(9,10),可以计算出:

$$K_{11}(T) = cp(1 - e^{-kT})/k + ap(e^{-bT} - e^{-kT})/(k - b) \quad (21)$$

$$K_{12}(T) = cp(1 - p)(e^{-kT} - e^{-2kT})/k + ap(1 - p)(e^{-(k+b)T} - e^{-2kT})/(k - b) \quad (22)$$

将式(18,19)代入式(12,13)得:

$$K'_{11}(T) = P_{ABAO}K_{11}(T)[ce^{-k(n+1)T}(e^{kT} - 1)/k + ae^{-k(n+1)T}(e^{(k-b)T} - 1)/(k - b)]/N_T \quad (23)$$

$$K'_{12}(T) = K_{12}(T)P_{ABAO}[ce^{-k(n+2)T}(e^{kT} - 1)/k + ae^{-k(n+2)T}(e^{(k-b)T} - 1)/(k - b)]/N_T \quad (24)$$

用 Matlab 对式(16) 仿真得到单位时间检修成本随状态检修周期的变化规律如图 5 所示。

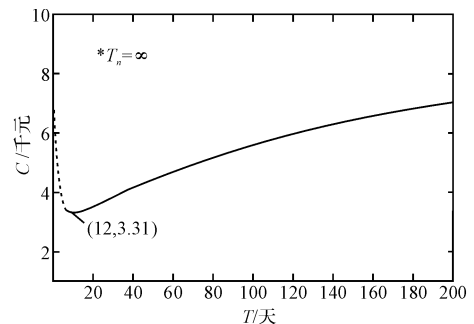


图 4 状态检测周期对单位时间检修成本的影响

T —状态检修周期, C —状态检修周期 T 内单位时间检修成本。

当 $T < 12$ 时,随着检修周期的增大,设备的过度检修趋于缓和,平均检修成本逐渐减小; $T > 12$ 时,设备的检修不足趋向于严重,设备故障率增加,导致平均检修成本随着增加。结果分析表明,当 $T = 12$ 时,单位时间平均检修成本取得最小 $C_{\min} = 3.31$,从而说明在单纯状态检修模式下,可以通过合理安排检修周期,使得平均检修成本最小,检修资源分配达到最优。

4.2 状态检测周期固定时计划检修周期对单位时间检修成本影响

当 T_n 较小时,设备故障率随时间的积累效应并不明显;随着 T_n 的增加,故障率增加得也相对较快;当 T_n 增加到足够大的时,由于设备故障率不能无限增加,而是趋近于一个极限。这里用反正切函数来模拟,设式(17)中:

$$C_A(T_n) = k_1 \arctan(k_2(T_n - k_3)) + k_4 \quad (25)$$

式中: $k_1 = 1, k_2 = 0.003, k_3 = 500, k_4 = 0.34$ 。

用 Matlab 对式(17)进行仿真。当 T 为固定值 12 时,单位时间检修成本随 T_n 变化规律如图 5 所示。

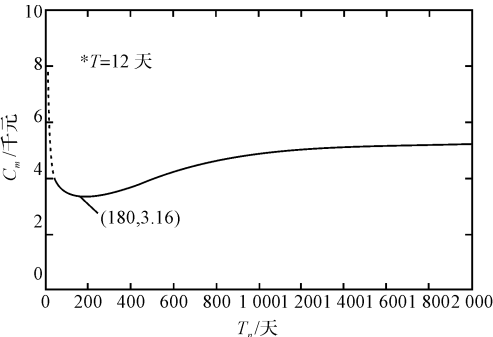
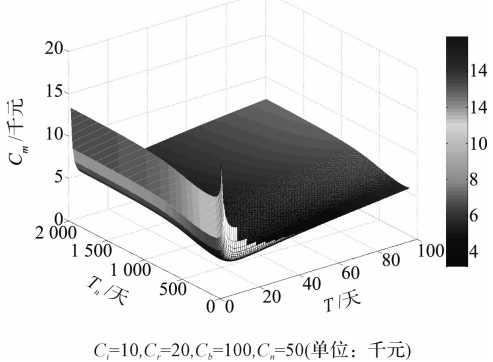


图5 计划检修周期对单位时间检修成本影响
 T_n —计划检修周期, C_m —计划检修周期内单位时间检修成本。

T 取为固定值 12,当 $T_n < 180$ 时,随着检修周期的增大,设备过度检修趋于缓和,平均检修成本减小;当 $T_n > 180$ 时,随着检修周期继续增大,设备趋向于检修不足,从而设备故障率增加,导致检修成本增加。结果分析表明,当 $T_n = 180$ 时,平均检修成本取得最小值 $C_{min} = 3.16$,说明当状态检修周期固定时,可以通过选取合理的计划检修周期,使检修成本最小。

4.3 状态检测周期和计划检修周期的联合优化

前面算例分析了单一模式下,可以通过合理安排检修周期使得检修效率达到最优。下面分析混合检修模式下当 T 和 T_n 同时变化时,目标函数 C_m 的变化规律,并找到最优解,在算例 1 的条件下,即取 $C_i = 10, C_r = 20, C_b = 100$ 时,Matlab 仿真结果如图 6 三维曲面图所示。



$C_i=10, C_r=20, C_b=100, C_p=50$ (单位:千元)

图6 混合检修模型检修周期对检修成本的影响

图 6 中,目标函数有唯一最小值,且当自变量取值为 $T = 35, T_n = 180$ 时,取得最小值 $C_{min} = 3.16$ 。算例 1 中计算结果可知,状态检修模式下,单位时间检修成本最小值为 $C_{min} = 3.31$,从而在当前条件下有 $C_{min} < C_{min}$ 说明混合检修模式相比于单一的状态检修模式节省了检修成本,验证了混合检修模式的有效性。

4.4 人为因素对单位时间维修成本的影响

(1) 在算例 1 的基础上,保持其他条件不变,取状态检修中完美检修和不完美检修为某一组固定值时,改变状态检测中的人为失误概率 Hep ,通过计算目标函数也即单位时间检修成本的变化趋势,分析状态检测中的人为因素对检修效率的影响。

状态检测中人为失误对检修成本的影响如图 7 所示。

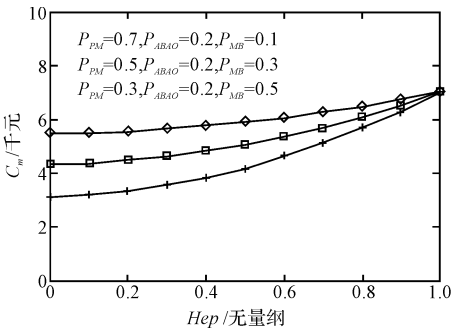


图7 状态检测中人为失误对检修成本的影响

由图 7 可知,几组数据中,随着状态检测中的人为失误概率 Hep 的增大,单位时间检修成本都呈逐渐增加趋势,说明提高状态检测中的人为因素可靠性能够节省检修成本,提高检修效率。但当状态检测人为失误概率趋近于 1 时,目标函数都趋向于同一个值,也说明当状态检测中失误概率超过一定值后,单方面地提高检修中的人为可靠性已经意义不大。

(2) 在算例 1 的基础上,保持其他因素不变,改变状态检修中的不完美检修和完美检修的比例,观察对最优检修周期及平均成本函数的影响规律,如表 2 所示。

表2 状态检修人为失误对检修成本及最优检修周期的影响(T, T_n /天; C_{min} /千元)

编号	P_{PM}	P_{ABAO}	P_{MB}	T	T_n	C_{min}
1	0.7	0.2	0.1	35	180	3.16
2	0.6	0.2	0.2	34	175	3.75
3	0.5	0.2	0.3	30	154	4.35
4	0.4	0.2	0.4	27	142	4.93
6	0.3	0.2	0.5	25	131	5.50
6	0.2	0.2	0.6	22	120	6.06

从上表可以看出随着不完美检修比例的增大,最

优检修周期呈减小的趋势同时平均检修成本呈现增大的趋势,这也是符合直观理解的:随着人为失误概率的增大,必须安排额外的检修,从而也增加了平均检修成本。最后也说明积极改善状态检修中的人为因素,提高检修的质量对合理安排检修周期和节省检修成本有很重要的意义。

5 结束语

本研究建立了一种基于时间延迟理论的状态检修与计划检修混合检修模型,并充分考虑了设备状态检测和设备检修过程中的人为因素影响。然后分析了在该检修策略下,检修周期及人为失误率大小对单位时间检修成本的影响。结果表明,在一定条件下,混合策略相比于单纯的状态检修策略能够节省检修成本、提高检修效率。另外分析了在其他因素不变的情况下,随着检修过程中人为失误率增大,单位时间平均检修成本逐渐增加,最优检修周期也随之改变。

下一步的工作主要是研究电力设备检修过程中人为影响因素的具体管控措施。

参考文献 (References):

- [1] 李文沅. 电力系统风险评估-模型、方法和应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] 李葆文. 设备管理新思维新模式[M]. 北京:机械工业出版社,1999
- [3] 史承逵. 适应电力市场的发展改革供电检修方式[J]. 电网技术,2002,26(10):71-74.
- [4] 许 婧,王 晶,高 峰,等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术,2000,24(8):48-52.
- [5] 姚祚义,艾爱国,王华峰. 火力发电厂实施状态检修的探讨[J]. 电力建设,2006,27(3):20-21.
- [6] 李 明,韩学山,杨 明,等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):43-52
- [7] 陈安伟. 输变电设备状态检修的应用[J]. 电网技术,2009,33(20):215-218.
- [8] 孙惟东,陆一春. 发电设备实施状态检修的思考[J]. 华东

电力,2000,28(4):37-39.

- [9] 徐长宝,庄 晨,蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):127-131.
- [10] 黄江倩,赵 舫,程伟华,等. 基于风险管理方法的配网检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(18):94-100.
- [11] FLAGE R. A Delay Time Model With Imperfect and Failure and Failure-Inducing Inspections[J]. **Reliability Engineering & System Safety**,2014(124):1-12.
- [12] NAKAGAWA T. Optimum Policies When Preventive Maintenance is Imperfect[J]. **IEEE Trans on Reliability**,1979,R-28(4):331-332.
- [13] 贾希胜,CHRISTER A H, SMITH M A J. 针对机械磨损过程的功能检测模型[J]. 中国机械工程,1998,9(12):34-37
- [14] 暴英凯,王逸飞,文云峰,等. 考虑人为因素的设备可靠度评估及定检周期决策[J]. 电网技术,2015,39(9):2546-2552.
- [15] CHRISTER A H. Innovative decision making[C]//Proceedings of the NATO Conference on the Role and Effectiveness of Theories of Decision in Practice. Hodder & Stoughton,1976:368-377.
- [16] 陈文静. 基于时间延迟模型的港口设备维修管理研究[D]. 秦皇岛:燕山大学管理科学与工程学院,2012.
- [17] 吕文元,郑 睿. 基于时间延迟的维修类型优化组合模型及案例分析[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(7):1654-1660.
- [18] 李鹏程. 核电厂数字化控制系统中人因失误与可靠性研究[D]. 广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2011.
- [19] 赵洪山,赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(11):56-62.
- [20] CHRISTER A H, WALLER W M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems[J]. **Journal of The Operational Research Society**,1984,35(5):401-406.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

文东山,焦 昊,暴英凯,等. 考虑人为因素的电气设备混合检修策略研究[J]. 机电工程,2016,33(9):1103-1108.

WEN Dong-shan, JIAO Hao, BAO Ying-kai, et al. Hybrid maintenance strategy of electric equipment incorporating human factor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(9):1103-1108.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>