基于效用和成本的状态检修维修方式选择研究

王 一[1]，王慧芳[1]，张 亮[2]，胡雪平[2]，张建浩[2]，倪钱杭[2]，何奔腾[1]

（1.浙江大学电气工程学院，浙江 杭州 310027；2.绍兴电力局，浙江 绍兴 312000）

摘要：提出了一种利用状态检修信息的基于效用和成本分析的维修方式选择决策模型。定义效用由状态健康指数、可靠性和可用性三个因子组成，给出了每个因子的计算公式，并分析了不同的维修方式对于各因子的影响。给出了维修成本的组成及计算方法，以及效用计算模型，最终导出了以单位成本提高的效用量最多为目标的维修方式选择模型。算例给出了某变压器在某种状态下进行维修方式选择的过程，结果表明该模型是合理可信的。该模型适用于电力设备维修管理，能够帮助维修人员作出经济、有效的维修方式选择。

关键词：状态检修；效用；维修方式选择；状态健康指数；可靠性

Research on maintenance type selection with CBM technology based on effectiveness and cost analysis

WANG Yi[1]，WANG Hui-fang[1]，ZHANG Liang[2]，HU Xue-ping[2]，ZHANG Jian-hao[2]，NI Qian-hang[2]，He Ben-teng[1]

（1. College of Electrical Engineering，Zhejiang University，Hangzhou 310027，China；
2. Shaoxing Electric Power Bureau，Shaoxing 312000，China）

Abstract：This paper proposes a maintenance type selection model based on effectiveness and cost analysis using CBM information. First，it defines effectiveness composed of three factors，namely，state health indictor，reliability and availability，gives each factor's formula，and analyzes the impacts of different maintanence types on each factor. Then，it gives maintenance cost's components with their formulas and effectiveness's calculating model. At last，it educes a maintenance type selection model aiming at most effectiveness per unit cost. Case study lists maintenance type selection process of a transfomer in certain state. The result shows that this model is reasonable and credible. This model is suitable for power equipment maintenance management，and can help maintenance staff make economic and effective maintenance arrangement.

Key words：condition based maintenance (CBM)； effectiveness； maintenance type selection； state and health indicator； reliability

中图分类号： TM732 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)19-0039-07

0 引言

设备检修是生产管理工作的重要组成部分。传统的定期检修与事后检修相结合的检修模式已经不能适应电网发展的要求，状态检修是解决当前检修工作所面临问题的重要手段。状态检修以设备当前的实际工作状况为依据，通过各种状态监测手段，识别故障的早期症状，对故障部位、故障严重程度及发展趋势作出判断，从而确定最佳维修方式。发达国家开展状态检修工作已有十多年的历史，并取得了显著成效[1]。近年来，我国也积极开展了与状态检修相关的在线监测、故障诊断、状态评价、软件开发等方面的研究，国家电网公司编制了状态检修相关规章制度和技术标准，某些地区的状态检修已经进入了全面实施阶段[2-7]。

然而目前状态检修研究还主要集中在设备的状态监测和评价方面，在应用状态评价结果进行维修方式选择方面研究还不充分。设备运行过程中可能多个部件的多个健康指标出现恶化，既可以选择维修单个故障严重部件解决主要问题，也可以同时修理多个故障部件解决所有问题；对同一部件也可以采用不同维修级别的维修方式，如解体性修理或功能性修理。有文献研究了基于可靠性理论的维修方式选择[8]，然而该可靠性指标是一个概率统计量，根据同类设备的故障率统计得出，与检修个体的实际状态联系不够紧密，缺乏针对性。因此，如何利用状态检修获得的个体信息进行针对性的维修方式选择是一个很有意义的研究方向。

本文提出采用效用和成本两个指标来评价维修方式的优劣。成本是采用某维修方式进行维修需要的经济成本；效用则是反映维修方式对设备性能的提升。本文提炼出由反映设备自身状态的状态健康指数、具有扩展含义的可靠性和可用性三个因子组成效用指标，使得效用指标既能反映同类设备的总体特征又突出了该设备的个体差异，能够更加客观反映该设备的实际效用。本文还分析了不同维修方式对各效用因子的影响以及维修成本、效用的计算过程，最终导出了以单位成本提高的效用量最多为目标的状态检修维修方式选择模型。

1 设备效用分析

1.1 效用定义

效用是用来反映设备总体性能的，因此可采用多种性能因子来综合反映[9-10]。常见的因子有可靠性、可用性、可维修性等，这些因子既独立又相互有影响。本文的效用是用来反映维修方式对设备性能的提升，因此提炼出设备状态健康指数、可靠性、可用性三个因子作为评价维修方式效用的组成因子。

设备状态健康指数反映设备当前健康状态，同时也是设备的先天质量、运行条件、历史维修情况、寿命等的综合体现。它是设备状态评价的直接结果，能反映设备故障的部位和严重程度，从而提高维修的针对性，因此是维修方式选择的基础，应独立作为一个重要因子包含在效用中。

可靠性的定义为在规定条件、规定时间内完成规定功能的能力。它与故障率有关，是一种统计概率。为了在可靠性因子中体现设备个体状态对可靠性的影响，把故障分为偶然性故障和必然性故障。偶然性故障反映同类设备的共性概率，而必然性故障则反映检修设备的个体健康状态所对应的个性概率。两者结合起来得到的可靠性因子更有助于检修方式的选择，因此把它作为另一重要因子。

可用性定义为设备在长期运行中处于正常工作状态的时间比例。它不仅与设备的可靠性相关，也与维修方式相关，主要体现在维修时间上，因此它也作为反映效用的主要因子。

由于可维修性可用维修质量来表示，并在健康状态指数中体现，因此不再单独作为效用因子。

可靠性和可用性侧重反映设备效用的外在表现，即故障与否、可用与否；状态健康指数则侧重于反映内在品质，通过它可以更全面准确地描述设备性能，从而能够区分不同的维修方式在恢复设备性能方面的优劣。因此，设备效用定义如式（1）所示。

$$V = V_1 \times V_2 \times V_3 \tag{1}$$

其中：V 为设备效用；V_1 为状态健康指数；V_2 为可靠性；V_3 为可用性。

1.2 状态健康指数计算

状态健康指数用状态评价得分来表示。依据输变电设备状态评价相关导则标准，首先将设备根据功能要求划分为 P 个部件，采用扣分制得到各部件的状态评价得分 S_p（p 取值范围为 $1\sim P$），然后分别乘以各自的权重值 ω_p 再相加，最终得到设备的状态评价得分 S。

要获得各部件的状态评价得分 S_p，首先要定义设备的状态扣分矩阵 $\boldsymbol{D}$。矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的行代表部件，列代表状态量，则元素 D_{pi} 代表与第 p 部件相关的第 i 状态量的扣分值。比如矩阵 $\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}15 & 0\\ 0 & 4\end{bmatrix}$，表示第 1 个部件的第 1 个状态量扣分 15 分，第 2 个部件的第 2 个状态量扣分 4 分。若某部件与某状态量没有关系或者状态良好，相应元素取值为 0。部件 p 的所有状态量扣分总和为 $D_p=\sum_{i=1}^{N} D_{pi}$，其中 N 为状态量个数。而 p 部件的状态评价最后得分应为满分 100 减去所有状态量扣分值，同时还与家族性缺陷及寿命有关，因此部件的最终状态评价得分公式如式（2）。

$$S_p = (100 - D_p) \times F_p \times T_p \tag{2}$$

其中：F_p 为家族性缺陷系数，对存在家族性缺陷的部件，可取 0.95；T_p 为寿命系数，根据相关导则取为（100−该部件的运行年数）/100，则该系数随着部件运行年数的增长而减小。

设备的最终状态评价得分为所有部件在考虑权重后的得分之和，计算公式如式（3）所示。

$$S = \sum_{p=1}^{P} \omega_p \times S_p \tag{3}$$

其中，ω_p 为部件的权重系数，$\sum_{p=1}^{P} \omega_p = 1$。

1.3 可靠性计算

可靠性可用可靠度和故障率来表示[11-13]。

可靠度的定义为 $R(t)=P\{T>t\},0\le t<\infty$，表示寿命 T 大于 t 的概率。它是时间段 $0\sim t$ 内的累积概率。假设设备整体性维修后恢复如新，则 t 归零，可靠度重新累积[13]。

故障率的定义为

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{1}{\Delta t}p(t<T\le t+\Delta t\mid T>t)=-\frac{\mathrm{d}\ln R(t)}{\mathrm{d}t} \quad (4)$$

因而可靠度与故障率的关系为

$$R(t)=\mathrm{e}^{-\int_0^t\lambda(t)\mathrm{d}t} \quad (5)$$

通常所说的可靠度表示的是时间段$0\sim t$内不发生故障的概率，而实际使用时关心的是某时刻不发生故障的概率，因此可以用短期可靠度模型来表述△t时间内的可靠性[14]。

$$R=\mathrm{e}^{-\lambda\Delta t} \quad (6)$$

由于设备所处实际环境复杂多变，并不能保证处于规定条件下，因此可靠度不单跟时间有关，还受到当前运行条件的影响。根据内外环境将故障分为两类：偶然性故障和必然性故障。

偶然性故障是由外部因素引起的，如人员误操作、保护误动、恶劣天气、过负荷、过电压等,其故障率分别由λ_{a1}、λ_{a2}、λ_{a3}、λ_{a4}…表示。与它相关的短期可靠度用Ra表示。

假设有J个外部因素会引起设备故障，第j个外部因素的发生概率为常数λ_{aj}，因此由式（6），可知与第j个外部因素相关的短期可靠度为$Ra_j=\mathrm{e}^{-\lambda_{aj}\times\Delta t}$。由于各个外部因素的发生事件是相互独立的，从可靠性的角度看，各个因素间是串联关系，因此偶然性故障相关的短期可靠度为

$$Ra=\mathrm{e}^{-(\sum_{j=1}^{J}\lambda_{aj})\Delta t} \quad (7)$$

必然性故障与设备本身状态有关，可以根据已知的状态评价得分来推算短期可靠度Rc。

各部件的故障率与各自的状态评价得分之间的关系为

$$\lambda_p=K_p\mathrm{e}^{-C_p\times S_p} \quad (8)$$

其中：K_p为比例系数；C_p为曲率系数。它们可以根据统计数据拟合得到。

根据式（6），可得

$$Rc_p=\mathrm{e}^{-\lambda_p\Delta t}=\mathrm{e}^{-K_p(\mathrm{e}^{-C_p\times S_p})\Delta t} \quad (9)$$

假设各部件之间的故障事件相互独立，那么

$$Rc=\prod_{p=1}^{P}Rc_p=\mathrm{e}^{-\sum_{p=1}^{P}\lambda_p\Delta t} \quad (10)$$

因为偶然性故障事件与必然性故障事件是相互独立的，因此总的可靠度

$$R=\mathrm{e}^{-(\sum_{p=1}^{P}\lambda_p+\sum_{j=1}^{J}\lambda_{aj})\Delta t} \quad (11)$$

1.4 可用性计算

可用性有多种表示方法，其中稳态可用度A是工程应用中特别感兴趣的，其定义为

$$A=\frac{T_\mathrm{U}}{T_\mathrm{U}+T_\mathrm{D}} \quad (12)$$

其中：T_U为一个周期内设备正常工作时间；T_D为一个周期内设备不能正常工作时间，即设备的维修时间。维修可能是预防性维修，也可能是事后维修，其用时分别为τ_{PM}和τ_{CM}。若设备运行了T时间之后进行维修活动，则[15]：

$$\begin{cases}T_\mathrm{U}=\int_0^T R(t)\mathrm{d}t\\ T_\mathrm{D}=\tau_{\mathrm{CM}}(1-R(T))+\tau_{\mathrm{PM}}R(T)\end{cases} \quad (13)$$

$$A=\frac{\int_0^T R(t)\mathrm{d}t}{\int_0^T R(t)\mathrm{d}t+\tau_{\mathrm{CM}}(1-R(T))+\tau_{\mathrm{PM}}R(T)} \quad (14)$$

式中的可靠度$R(t)$为累积可靠度，根据式（5）、式（8），并将积分做累加简化，将t时间以Δt为间隔划分成N_t等份，简化计算$R(t)$，过程如下：

$$R_p(t)=\mathrm{e}^{-\int_0^t\lambda_p(\tau)\mathrm{d}\tau}=\mathrm{e}^{-\sum_{n=0}^{N_t}K_p\mathrm{e}^{-C_pS_p(n)}\Delta t} \quad (15)$$

$$Rc(t)=\prod_{p=1}^{P}R_p(t)=\mathrm{e}^{-\sum_{p=1}^{P}(\sum_{n=0}^{N_t}\lambda_p(n)\Delta t)} \quad (16)$$

$$R(t)=Ra(t)\times Rc(t)=\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_t}\lambda(n)+\lambda_a\times N_t]} \quad (17)$$

其中：$\sum_{p=1}^{P}\lambda_p(n)=\lambda(n)$；$K_p\mathrm{e}^{-C_pS_p(n)}=\lambda_p(n)$；$\sum_{j=1}^{J}\lambda_{aj}=\lambda_a$；$N_t\Delta t=t$。

将式（17）代入A的计算中，可得

$$\begin{cases}T_\mathrm{U}=\Delta t\sum_{N_t=0}^{N_T}\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_t}\lambda(n)+\lambda_a\times N_t]}\\ T_\mathrm{D}=\tau_{\mathrm{CM}}\times(1-\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_T}\lambda(n)+\lambda_a\times N_T]})+\tau_{\mathrm{PM}}\times\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_T}\lambda(n)+\lambda_a\times N_T]}\end{cases} \quad (18)$$

$$A=\frac{\Delta t\sum_{N_t=0}^{N_T}\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_t}\lambda(n)+\lambda_b\times N_t]}}{\Delta t\sum_{N_t=0}^{N_T}\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_t}\lambda(n)+\lambda_b\times N_t]}+\tau_{\mathrm{CM}}\times(1-\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_T}\lambda(n)+\lambda_b\times N_T]})+\tau_{\mathrm{PM}}\times\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_T}\lambda(n)+\lambda_b\times N_T]}} \quad (19)$$

其中：$N_T\Delta t=T$，表示将T时间以Δt为间隔划分成

N_T 等份。

2 维修方式对设备效用的影响

2.1 维修方式对状态健康指数的影响

定义维修质量矩阵 $\boldsymbol{Q}$，Q_{pi} 表示维修对 p 部件 i 状态量的影响。不维修时，$\boldsymbol{Q}$ 的所有元素均为 1，维修程度越好 Q_{pi} 越接近 0。如 $\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}0 & 0.5\\ 1 & 1\end{bmatrix}$，表示此次维修只修理了部件 1，状态量 1 得到了很好的改善，状态量 2 得到了部分改善。

假设修理时所处外部环境符合修理要求而且所需维修材料充足，那么维修质量只与所选维修方式解决问题的能力 G 和维修难度 H 有关。G、H 的取值需要大量经验和实际检修案例验证，本文根据有限的经验和案例验证，得出了以下参考数据：维修方式解决问题的能力分为完全解决、基本解决、部分解决和稍微改善四级，其对应 G 的评分为 0.1、0.3、0.5、0.8；维修难度则由技术要求 H_1、维修人员技术水平 H_2 和风险系数 H_3 三个影响因素组成，随着技术要求的提高、维修人员技术水平的下降，风险系数的增加，维修难度增大，各因素的得分可参考表 1。

表 1 维修难度影响因素取值原则

Tab.1 The value principle of maintenance difficulty factors

技术要求 H_1	很高	高	一般	低	很低
技术水平 H_2	很低	低	一般	高	很高
风险系数 H_3	很高	高	一般	低	很低
得分	0.8	0.9	1	1.1	1.2

根据经验，困难度对事物的影响往往是指数级，以维修方式解决问题的能力等级为基础结合指数级困难度的影响，得到维修质量得分

$$Q_{pi}=G^{H} \tag{20}$$

其中，$H=H_1\times H_2\times H_3$。

维修后的部件状态扣分值应为 $D_p'=\sum_{i=1}^{n}D_{pi}\times Q_{pi}$，根据式（2）扣分矩阵与各部件状态得分的关系，可以得到经过维修后各部件的状态得分值 S_p'：

$$S_p'=(100-\sum_{i=1}^{n}(D_{pi}\times Q_{pi}))\times F_p'\times T_p' \tag{21}$$

再经过式（22）可以得到维修后该设备的状态评价得分 S'。

$$S'=\sum_{p=1}^{P}\omega_p S_p' \tag{22}$$

不同的维修方式其解决问题的能力不同，从而决定了维修质量的基础得分不同。如油箱渗油，若暂时先拧紧螺丝应急处理，它只能部分解决问题，之后可能还会渗漏；若对其进行完整地检查，找到问题根源并进行修理，那就能完全解决问题了。维修难度在维修方式解决问题能力的评价基础上指数级地影响维修质量，若维修难度高，会降低维修质量，即在基础得分的基础上相应增加 Q 的分值；若维修难度低，则相反。

另外，不同的维修方式修理部件的数量不同，整体修理可以改善所有故障部件的所有状态量，局部修理只能改善严重故障部件的几个状态量。若采用更换部件的方式，修理后该部件为全新状态，寿命系数 $T_p=1$，家族性缺陷系数 F_p 也会有变化。综上所述，经过不同的维修方式修理后会导致状态健康指数的不同。

2.2 维修方式对可靠性和可用性的影响

采用不同的维修方式之后，各部件的状态得分值 S_p' 就会不同，根据式（8）、式（11），维修后的设备故障率 λ 和短期可靠度 R 会相应地发生变化。同样由于各种维修方式的修理时间 τ_{PM} 不同，从而影响了可用性 A 的值。此外，整体修理后 A 中的可靠度 $R(t)$ 重新累积。

3 基于成本-效用的维修方式选择过程

3.1 维修成本计算

不同的维修方式，所需维修成本不同。维修成本一般包括人工成本、材料成本和机械成本，但考虑到不同维修方式可能产生不同的供电中断成本，因而在维修决策时应予以考虑。

人工成本 C_1 包括电力企业维修人员人工成本和辅助工人工成本；材料成本 C_2 包括消耗性材料成本和装置性材料成本；机械成本 C_3 包括检修机械使用费、检修机械安拆费和场外运输费；供电中断成本 C_4 等于停电检修期间损失的供电量乘以单位电量平均电费利润。当预防性维修通过调度方式安排转移全部受影响负荷时，供电中断成本为 0。

3.2 效用计算

假设一个设备由 P 个部件组成，有 N 个状态量，有 J 个引起偶然性故障的外部因素，在距离上次整体性维修后 T 时刻进行维修。

根据式（1），因为 V_2、V_3 反映的是概率值，为了统一各因素的量纲，将 V_1 取值化到 $(0,1)$ 区间内。下面给出了维修前后的效用计算公式。

1）维修前效用

式（19）中的预防性维修时间τ_{PM}为 0，则有

$$\begin{cases} V_1=(\sum_{p=1}^{P}\omega_P F_p T_p(100-D_p))/100 \\ V_2=\mathrm{e}^{-(\sum_{p=1}^{P}\lambda_p+\lambda_a)\Delta t} \\ V_3=\dfrac{\Delta t\sum_{N_t=0}^{N_T}\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_t}\lambda(n)+\lambda_a\times N_t]}}{\Delta t\sum_{N_t=0}^{N_T}\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_t}\lambda(n)+\lambda_a\times N_t]}+\tau_{\mathrm{CM}}\times(1-\mathrm{e}^{-\Delta t[\sum_{n=0}^{N_T}\lambda(n)+\lambda_a\times N_T]})} \end{cases} \tag{23}$$

2）维修后效用

维修之后，受到维修质量矩阵的影响，状态评价得分变为S'，将其代入式（23），可得到维修后的V_1'和V_2'；同时式（19）中的预防性维修时间τ_{PM}不为 0，将式（19）代替维修前的V_3，可得到维修后的V_3'。因此，维修后的效用为

$$V'=V_1'\times V_2'\times V_3' \tag{24}$$

3.3 维修方式选择模型

根据综合经济效益E来选择最佳维修方式。

$$E=\frac{\Delta V}{C}=\frac{V'-V}{C} \tag{25}$$

它表示该维修方式单位成本能够提高的效用量。E越大，表示单位成本提高的效用越多，该方案越具有经济性、有效性。

4　算例分析

以某局 2000 年投运的某 220 kV 主变维修方式选择为例。变压器由 8 个部件组成，分别为绕组 P1、套管 P2、铁心及磁回路 P3、分接开关 P4、冷却系统 P5、绝缘油 P6、油箱 P7 和非电量保护系统 P8。变压器偶然性故障的故障率约为λ_a=6.278×10^{-3} 次/台年。根据专业人员的建议，维修人员综合工日单价为 80 元/工；辅助工综合工日单价为 50 元/工。根据相关导则及检修经验，已知该变压器信息如表 2 所示。

变压器状态量的获得有实时监测（天）也有周期试验（月或年），为统一单位，可靠度计算中取$\Delta t=1/365$，n按天数递增。

自上次整体性修理之后 400 天左右，该变压器有载分接开关筒体内漏，其对应的状态扣分为 20 分，无缺陷前的状态评价得分为 91 分，出现缺陷后的状态评价得分为 88.3 分。该状态下的事后维修平均修理时间 τ_{cm}=10 天。维修前的效用见表 3。

表 2 某 220 kV 变压器已知信息

Tab.2 Information of a 220 kV transformer

部件	绕组	套管	铁芯	分接开关	冷却系统	绝缘油	油箱	非电量保护系统
编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
ω_p	0.3	0.1	0.05	0.15	0.05	0.20	0.05	0.1
K_p	12.30	12.30	15.91	12.30	15.91	15.91	15.91	12.30
C_p	0.042	0.042	0.051	0.042	0.051	0.051	0.051	0.042
T_p	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
F_p	1	1	1	1	1	1	1	1

表 3 维修前的效用

Tab.3 The effectiveness before maintenance

V_1	V_2	V_3	V
0.882 7	0.994 5	0.955 5	0.838 8

通过分析，可采用如下两种维修方式：

1）整体修理。进行吊罩处理，更换整个有载分接开关，能完全解决问题，更换之后其对应的寿命系数$T_4=1$。

2）局部修理。根据变压器的情况处理，不吊罩，仅更换筒体，能基本解决问题。

假设维修之前通过调度安排能够完全避免供电中断损失，即C_4=0。两种维修方式的修理信息见表 4，根据 3 中分析所得计算结果见表 5。由表 5 可知，局部修理的综合经济效益远大于整体修理，所以应该选择局部修理方式。

分析以上两种维修方式的效用可以发现：尽管整体修理风险大、技术要求高，会增大维修难度，使得维修质量的指数得分低，但是它修理彻底，解决问题的能力高于仅更换筒体的局部修理方式，使得维修质量的基础得分高，导致最终整体修理的维修质量要高于局部修理。此外，整体修理更换了部件大大提高了寿命系数，因此整体修理的状态健康指数比局部修理提高得多。可靠性与状态健康指数相关，因此整体修理的可靠性也较局部修理大。然而整体修理花费时间较长，所以它的可用性要低于局部修理。综合三个效用因子，整体修理的效用提高量 0.027 6，要大于局部修理效用的提高量 0.016 6。

整体修理的成本 9.6 万元远大于局部修理的成本 2.7 万元。综合效用和成本分析，局部修理单位成本提高的效用量 6.194 远大于整体修理的 2.861，因此它是最佳维修方式。

按照以往惯例，变压器出现类似扣分状态时一般采用整体修理。经过本文介绍的方法进行决策后，

该变压器采用了局部修理方式，结果表明，局部修理后获得了很好的效益。由此可见，通过维修方式选择模型的量化计算，能突破保守思维，使新的维修方式得以被选择实施，从而使决策更加科学合理，并在保证可靠性等效用的同时节约了维修成本。

表 4 两种维修方式的修理信息

Tab.4 Maintenance information for each maintenance mode

维修方式	修理内容	维修人员综合工日/工	辅助工综合工日/工	维修所需时间/天	材料成本/万元	机械成本/万元	解决问题的能力 G	技术要求 H_1	维修人员的技术水平 H_2	风险系数 H_3	维修质量 Q_4	维修后寿命系数 T_4
整体修理	吊罩（更换有载分接开关）	131	60	10	5.2	3.1	0.1	0.8	1.2	0.8	0.171	1
局部修理	不吊罩（更换筒体）	60	20	4	1.1	1	0.3	0.9	1.2	1	0.272	0.91

表 5 两种维修方式的成本、效用计算结果

Tab.5 Calculating results for each maintenance mode

维修方式	效用计算						成本计算/万元				$E=\Delta V/C$
	修理前 V	V_1'	V_2'	V_3'	V'	ΔV	C_1	C_2	C_3	C	（10^{-3}）
整体修理	0.838 8	0.918 4	0.995 5	0.947 7	0.866 4	0.027 6	1.348	5.2	3.1	9.648	2.861
局部修理	0.838 8	0.902 6	0.995 2	0.952 3	0.855 4	0.016 6	0.58	1.1	1	2.68	6.194

5 结论

本文提出了一种基于状态检修技术的设备维修方式选择模型，用效用和成本作为评价各种维修方式的指标，根据综合经济效益，即单位成本提高的效用量最大为模型目标来选择维修方式，并且通过算例分析验证了该方法的合理性。在效用计算中不仅引入了设备状态健康指数，并利用状态检修获取的设备状态信息，提出了一种新的可靠度计算方法，能综合考虑设备使用时间以及自身状态对于可靠性的影响。本文所介绍方法适用于电力设备维修管理，可以帮助维修人员做出经济、有效、合理的维修安排，减少维修成本，提高设备利用率，延长设备使用寿命。然而本文提出的维修方式选择模型的应用前提是拥有完整、有效、充足的设备相关信息，目前由于状态检修工作刚起步，不少信息的获得还存在较大困难，为了更好地实现维修方式选择，当务之急是完善数据库，尤其要重视设备状态信息和修理信息的保存和整理。

参考文献

[1] 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.
XU Jing，WANG Jing，GAO Feng，et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology，2000，24（8）：48-52.

[2] 黄建华，全零三. 变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J]. 电力系统自动化，2001，25（16）：56-61.
HUANG Jian-hua，QUAN Ling-san. Current status development of condition-based maintenance of high-voltage electric power equipment in substation[J]. Electric Power Systems，2001，25（16）：56-61.

[3] 宋人杰，王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器，2008，36（9）：54-57.
SONG Ren-jie，WANG Xiao-dong. Research on assessment and analysis system of condition-based maintenance for power transmission and transformation equipment[J]. Relay，2008，36（9）：54-57.

[4] 曹先常，史进渊，蒋安众，等. 基于模糊数学的电站设备故障风险定量研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25（23）：119-123.
CAO Xian-chang，SHI Jin-yuan，JIANG An-zhong, et al. Based on fuzzy mathematics failure risk quantitative

analyses for power station equipment[J]. Proceedings of the CSEE，2005，25 （23）：119-123.

[5] 苏鹏声，王欢. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电力系统自动化，2003，27（1）：61-65.
SU Peng-sheng，WANG Huan. Technology analysis of state monitoring and fault diagnosis in electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2003，27（1）：61-65.

[6] 刘有为，李光范，高克利，等. 制定《电气设备状态维修导则》的原则框架[J]. 电网技术，2003，27（6）：64-67.
LIU You-wei，LI Guang-fan，GAO Ke-li，et al. Fundamental frame to draft guide for condition maintenance of electric power equipment[J]. Power System Technology，2003，27（6）：64-67.

[7] 张怀宇，朱松林，张扬，等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术，2009，33（13）：70-73.
ZHANG Huai-yu，ZHU Song-lin，ZHANG Yang，et al. Research and implementation of condition-based maintenance technology system for power transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology，2009，33（13）：70-73.

[8] 郭基伟，柳纲，唐国庆，等. 电力设备检修策略的马尔科夫决策[J]. 电力系统及其自动化学报，2004（4）：6-10.
GUO Ji-wei，LIU Gang，TANG Guo-qing，et al. Markov decision process on electrical equipments maintenance optimization[J]. Proceedings of the EPSA，2004（4）：6-10.

[9] Paul H B，David P W. Life cycle cost tutorial[C]. // Fifth International Conference on Process Plant Reliability. Houston（USA）: 1996.

[10] Paul H B. Life cycle cost & reliability for process equipment[C]. //Eighth Annual Energy Week Conference & Exhibition. Houston（USA）: 1997.

[11] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安：西北工业大学出版社，2000.

[12] 张晨. 基于可靠性的设备经济寿命与预防性维修周期的研究[D]. 南京：南京理工大学，2006.
ZHANG Chen. Research on equipments' economic life and preventive maintenance cycle based on reliability[D]. Nanjing：Nanjing University of Science & Technology，2006.

[13] 曹晋华，程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[14] 何剑，程林，孙元章，等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报，2009，29（7）：39-46.
HE Jian，CHENG Lin，SUN Yuan-zhang，et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment [J]. Preceedings of the CSEE，2009，29（7）：39-46.

[15] 李剑涛，蒋里强，黄立波. 装备最佳预防性维修间隔时间研究[J]. 装备指挥技术学院学报，2004，15（3）：26-29.
LI Jian-tao，JIANG Li-qiang，HUANG Li-bo. Study on the interval in the best equipment preventive maintenance[J]. Journal of Institute of Command and Technology，2004，15（3）：26-29.

收稿日期：2009-10-23

作者简介：

王　一（1985-），女，硕士研究生，主要研究方向为电力系统继电保护和控制、状态检修技术；

王慧芳（1974-），女，博士，副教授，主要研究方向为电力系统继电保护和控制、设备全寿命周期理论；E-mail: huifangwang@zju.edu.cn

张　亮（1962-），高级工程师，主要研究方向为变电设备检修管理。

（上接第 38 页　continued from page 38）

[12] 肖登明. 电力设备在线监测与故障诊断 [M]. 上海：上海交通大学出版社， 2005：43-69.
XIAO Deng-ming. Electrical equipment on line monitoring and fault diagnosis[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press，2005：43-69.

[13] Thomas Dean，James Allen，Yiannis Aloimonos. 人工智能-理论与实践[M]. 北京：电子工业出版社，2004：138-139，143-149.
Thomas Dean，James Allen，Yiannis Aloimonos. Artifical intelligence theory and practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry，2004：138-139，143-149.

收稿日期：2009-10-08；　修回日期：2010-01-10

作者简介：

张　帆（1984-），男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统继电保护；Email: zhfanddd@sjtu.edu.cn

邰能灵（1972-），男，教授，博士生导师，主要研究方向为继电保护及电力市场；

胡　炎(1975-)，男，博士，高工，主要研究方向为电力二次系统安全防护、电力系统和保护仿真、调度自动化技术等。