

核电厂数字化人-机界面监视转移路径预测方法及其应用

胡 鸿^{1,2}, 张 力^{2,3}, 蒋建军³, 易灿南², 戴立操³, 陈青青²

1. 南华大学核科学与技术学院, 湖南衡阳, 421001; 2. 湖南工学院人因工程与安全管理研究所, 湖南衡阳, 421001;
3. 南华大学人因研究所, 湖南衡阳, 421001

摘要: 核电厂操纵员在监视核电厂数字化人-机界面参数信息时, 某些时刻难以判断下一个最可能的监视目标, 从而导致监视延迟或转移失误的情况。为更好研监视路径预测问题, 提出基于马尔可夫过程的监视过程预测路径规划方法, 包括监视过程预测路径模型、监视过程预测路径规划算法、转移路径成功率算法。基于提出的方法, 对核电厂蒸汽发生器传热管破裂事故操纵员监视转移行为进行分析, 以数字化人-机界面作为 t 时刻监视任务的信息源节点, 可以准确预测到下一个监视目标的转移路径, 提高操纵员监视绩效并成功地降低监视失误风险。

关键词: 核电厂; 数字化人-机界面; 监视转移; 路径预测; 马尔可夫过程

中图分类号: F407.23 **文献标志码:** A

0 引 言

操纵员在监视核电厂数字化人-机界面参数信息中, 在某些时刻难以判断下一个最可能的监视目标, 从而导致监视延迟或转移失误。本文针对操纵员监视过程的转移活动, 提出从当前系统状态出发来预测下一个可能需要到达监视对象的预测路径规划方法, 以帮助操纵员准确快速地筛选并转移到下一个有效监视目标, 减少监视活动中的人因失误, 提高监视绩效与可靠性。该方法也为剖析操纵员监视转移行为驱动机制与优化人-机界面奠定基础。

1 监视过程预测路径规划模型

监视过程预测路径规划是指对监视过程中每完成对系统当前状态或参数信息的监视后, 如何快速准确地搜索下一个监视目标, 以确保操纵员对核电厂状态的持续监视, 以及信息的准确获取。对核电厂操纵员的调查与访谈结果表明, 监视目标之间是关联的, 下一目标搜寻通常依据系统当前时刻运行状态或参数来判定, 它们之间呈现出逻辑关系。即监视转移仅与当前时刻系统状

态或参数相关, 可用马尔可夫过程模拟。由于整个任务过程是动态变化的, 本文提出一种路径选择算法及马尔可夫路径成功率计算方法。路径预测即是从所有可能的路径中选择关联度最高的一条作为下一个监视目标的路径。本文提出图 1 所示的动态规划模型来描述该过程。

2 监视过程预测路径动态规划算法

由图 1 可见, 监视过程预测路径规划算法采用向后多路径查找有效规划, 利用动态规划方法从当前监视的系统状态目标求出下一可能监视的状态目标, 以保证每次以最大成功率及最优方式到达监视目标。监视过程预测路径规划算法如下:

在 t 时刻, 从初始目标 $Object_t$ 出发:

(1) $Ini_Filter(t, t+1, task_info)$: 把当前时刻 t 与下一时刻 $t+1$ 监视的任务信息完全无关的筛选掉, 即初步过滤。

(2) $Next_Obj_Pro(t, t+1, n)$: 以 t 时刻监视信息为源点, 计算在 $t+1$ 时刻 n 条可能到达的监视路径的成功率。

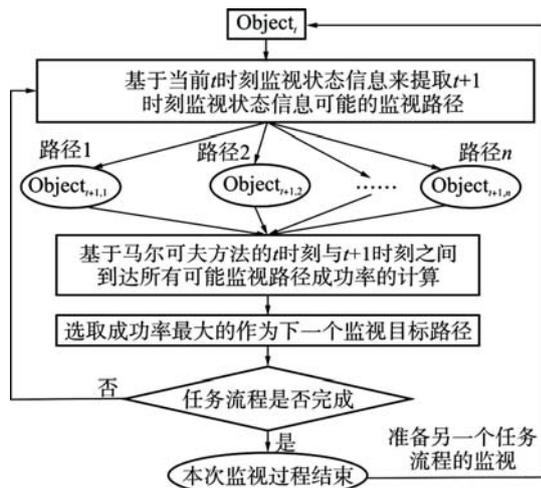


图1 监视路径预测规划模型流程图

Fig. 1 Flowchart of Monitoring Path Prediction and Plan Model

Object_t—*t*时刻所监视目标对象的状态信息; Object_{t+1,*n*}—在*t*+1时刻将要监视目标对象*n*的状态信息

(3) Values(*t*+1,*n*):把*t*+1时刻*n*条可能到达监视路径的成功率保存到 Values 数组中。

(4) Max(*t*+1,*n*):从 Values 数组中查找成功率的最大值。

(5) Transfer_route(*t*+1):根据最大成功率得到相对应的下一个监视目标路径。

(6)End():如果本次任务结束,准备下一个任务的监视,转向(1);否则转向(2),继续本次任务流程的监视。

3 监视过程预测路径动态规划关键算法

第2节提出的算法表明,核电厂数字化人-机界面监视过程预测路径动态规划所包含的关键方法为 Ini_Filter(*t*,*t*+1,task_info)方法(信息之间相关性的筛选方法)与 Next_Obj_Pro(*t*,*t*+1,*n*)方法(信息之间监视转移成功率的计算方法)2种。

3.1 Ini_Filter(*t*,*t*+1,task_info)算法

核电厂数字化人-机界面呈现的监视任务信息很多,将与当前监视目标信息不相关信息筛选掉,可有效简化搜索路径与减少监视转移成功率的计算量。对于筛选过程,研究人员一般根据任务之间的指标相关性或语义相似性或属性之间的相似性来确定相似程度^[1-3],本文利用多分枝模型树来进行筛选,算法如下:

(1) Build_tree(*n*):在数据库中建立具有 *n*

个结点的树形结构。该过程是一个反复训练、学习及专家分析的过程。即先对每棵数进行标识(区分不同任务信息对应建立不同树结构),每个节点要标识编号及任务特征,树的根节点表示任务源,从根节点出发,通过反复训练及专家分析,如果当前任务节点信息与下一个任务信息存在可能相关性,则下一相关任务节点作为当前任务节点的子节点,并不断循环直到结束,形成该任务过程树,然后对该树进行反复训练、学习与修正形成专家系统。

(2) Search(tree,relative_edge):根据任务型号及特征,在相应的树型结构中查找当前任务节点的所有子任务节点,并把该次查找到的节点加以标识;标识的方法是用2个数组分别存放当前节点与子节点序列对应的相关信息。从数组 Crrrent_array 与 Child_array 取对应的父节点与子节点信息形成计算路径,以计算其成功率。

3.2 Next_Obj_Pro(*t*,*t*+1,*n*)算法

操纵员在数字化人-机界面中执行监视任务,其监视转移依据主要来源于系统人-机界面呈现的信息,以及操纵任务对应的规程信息,故可假设操纵员监视行为是数据驱动的,若操纵员处理任务所需知识足够,则操纵员执行监视活动的下一状态只与当前状态相关,且根据当前信息状态进行转移,符合马尔可夫性。

马尔可夫性的数学表述为^[4]:若对任意正整数 *n* 及任意的随机变量 *x_i*,只要:

$$P(X_1 = x_{i1}, X_2 = x_{i2}, \dots, X_n = x_{in}) > 0 \quad (1)$$

$$P(X_{n+1} = x_{in+1} | X_1 = x_{i1}, X_2 = x_{i2}, \dots, X_n = x_{in}) \\ = P(X_{n+1} = x_{in+1} | X_n = x_{in}) \quad (2)$$

式中, *X* 表示状态集; *P* 表示状态之间的转移概率。

如何转移到下一任务,本研究只考虑2个主要因素,即:任务信息状态及操纵员的决策过程,转移成败由这2个因素决定,符合概率中的乘法原理,则转移路径失败率可定义为:

$$\text{failure_Tranfer_path_probility}(t,t+1) \\ = P(\text{rask}_{t+1} | \text{rask}_t, \text{rask}_{t-1}, \dots, \text{rask}_1) p(\text{task}_{t+1} | \text{decision}_t, \\ \text{decision}_{t-1}, \dots, \text{ecision}_1) \quad (3)$$

式中, rask_{*t*} 表示当前 *t* 时刻的任务信息状态; rask_{*t*+1} 表示 *t*+1 时刻可能要转移到任务信息目标; decision_{*t*} 表示 *t* 时刻操纵员的监视路径筛选决策过程。式(3)表明转移过程主要受任务的状态与操纵员监视路径筛选决策2个因素的影响。监视任务状态是对应系统某时刻客观物理特性,

监视路径筛选决策行为是操纵员的心智活动，根据式（2）所表达的马尔可夫特点， $t+1$ 时刻转移影响因素只与 t 时刻的因子有关，因此式（3）可简化为：

$$\begin{aligned} & \text{failure_Tranfer_path_probility}(t,t+1) \\ & =P(\text{rask}_{t+1}|\text{rask}_t) p(\text{task}_{t+1}|\text{decision}_t) \end{aligned} \quad (4)$$

则转移成功率为：

$$\begin{aligned} & \text{Succ_Tranfer_path_probility}(t,t+1) \\ & =1-P(\text{rask}_{t+1}|\text{rask}_t)*p(\text{task}_{t+1}|\text{decision}_t) \end{aligned} \quad (5)$$

对式（5）的计算过程分2部分进行论述：

（1） $P(\text{rask}_{t+1}|\text{rask}_t)$ 的计算。 $P(\text{rask}_{t+1}|\text{rask}_t)$ 表示在当前时刻 t 任务信息状态下，转移到时刻 $t+1$ 任务信息状态下的失误率。根据有关研究^[5]，可得到在2个状态之间，时间间隔为 Δt 时的状态转移失误率计算如表1所示。

表1 2个相邻状态之间转移失误率计算表达式^①
Table 1 Calculation Formulae of Transfer Error Probability between Two Consecutive States

$P\{ \text{task}_j(t) \text{task}_j(t-1) \}$		$\text{task}_j(t-1)$	
$\text{task}_j(t)$	0	0	1
		$\exp[-F_p(t)\Delta t]$	0
	1	$\exp[F_p(t)\Delta t]-1$	1

注：① $\text{task}_j(t)=0$ 表示当前状态正常； $\text{task}_j(t)=1$ 表示当前状态异常； $F_p(t)$ 表示 $\text{task}_j(t)$ 的监视失败率

（2） $p(\text{task}_{t+1}|\text{decision}_t)$ 计算。 $p(\text{task}_{t+1}|\text{decision}_t)$ 说明转移到下一目标由当前时刻操纵员决策决定，即计算当前时刻决策失误率，因此 $p(\text{task}_{t+1}|\text{decision}_t)$ 在计算上与 $p(\text{decision}_t)$ 是等价的，即：

$$p(\text{task}_{t+1}|\text{decision}_t) \Leftrightarrow p(\text{decision}_t) \quad (6)$$

决策过程主要受到监视任务的目标信息物理特征及操纵员个人因素影响。受多个因素影响的决策过程可简化表达为：

$$P(\text{decision}_t)=P(\text{decision}_t|\text{taskcharacter, human_factors}) \quad (7)$$

式（8）实际上是一个多条件下的计算问题，根据相关研究^[6]，多父节点条件概率可通过单父节点条件概率求出，计算表达式如下：

$$\begin{aligned} & P(N=S_{N_i} | M_1=S_{M_1,P_1}, M_2=S_{M_2,P_2}, \dots, M_K=S_{M_K,P_K}) \\ & = \lambda \sum \left[\prod_{j=1}^{j=k} P(N=S_{N_i} | M_j=S_{M_j,P_j}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n P(N=S_{N_i} | M_1=S_{M_1,P_1}, M_2)$$

$$= S_{M_2,P_2}, \dots, M_K = S_{M_K,P_K}$$

基于在核电厂的研究经验、操纵员访谈分析及他人研究^[7-10]结果，主要考虑6个决策因子（表2）。

根据表2中影响因子，把式（7）与式（8）联合进行推导可得到如下 $P(\text{decision}_t)$ 计算式：

$$\begin{aligned} & p(\text{decision}_t) \\ & = \sum_{x=1}^{x=6} \left\{ \sum \left[\prod_{y=1}^k p(\text{decision}_t | dy) \right] \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中， x 为决策影响因子个数； y 为因子状态数。

表2 影响操纵员决策的相关因子
Table 2 Correlation Factors with Effects on Operators' Decision

决策影响因子	变量	决策影响因子	变量
操纵员知识经验	d_1	操纵员培训水平	d_2
任务复杂性	d_3	决策支持系统	d_4
压力水平	d_5	时间压力	d_6

4 应用实例

以某数字化核电厂蒸汽发生器传热管破裂事故(SGTR)为例，取SGTR过程中3K00118YMA数字化人-机界面作为 t 时刻的监视任务信息源节点。实验设备为眼动仪、虚拟操纵员工作站、事故仿真画面。实例分析按照上述建立的监视过程预测路径规划方法进行。

（1）Build_tree(n): 通过该算法建立SGTR监视路径树。

（2）在 t 时刻，从初始监视目标为3K00118YMA(父节点a)的数字化人-机界面出发。

（3）根据Search(tree,relative_edge)算法从SGTR监视路径树中查询与父节点a(3K00118YMA画面)相连接的所有子节点画面，经Search(tree,relative_edge)算法得到父节点及下一目标可能要监视子节点的画面，分别为子节点画面b(3K00121YMA画面)、子节点画面c(3K00119YMA画面)、子节点画面d(3K00120YMA画面)、子节点画面e(3K00123YMA画面)与子节点画面f(3K00122YMA画面)。

（4）根据build_calculation_path(parent_node,child_node)算法，得到父节点与子节点的树型结构(图2)。

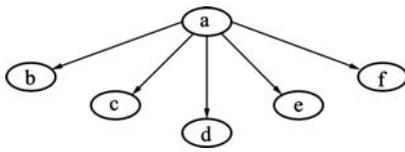


图2 SGTR 事故过程中所选取的父节点画面及其子节点

Fig. 2 Father Node and Its Child Nodes Selected in SGTR Accident

(5) Next_Obj_Pro (t,t+1,n)的计算。为描述方便, 转移路径成果率计算分 2 个部分, 即: $P(rask_{t+1}|rask_t)$ 和 $P(decision_t)$ 的计算。下面分别对这 2 部分进行描述:

$P(rask_{t+1}|rask_t)$ 的计算。事故发生后当前任务状态与下一目标任务状态处于异常, 根据表 1 得到计算式为:

$$p(task_j(t)|task_j(t-1)) = e^{F_p(t)\Delta t} - 1 \quad (10)$$

父节点与每个子节点的参数, 根据实验分析得到表 3。

根据式 (10) 及表 3, 得到父节点与每个子

节点的 $P(rask_{t+1}|rask_t)$ 值 (表 4)。

$P(decision_t)$ 的计算。表 2 的 6 个决策影响因子中, d_1 、 d_2 、 d_5 、 d_6 因子与操纵员本身有关, 与执行任务无关, 即: 与执行路径无关, 但在执行过程中会呈现不同的状态。根据文献[6、11]可获得因子 d_1 、 d_2 、 d_5 、 d_6 的状态取值情况, 应用式(7)可得到表 5。

因子 d_3 、 d_4 根据实际情况, 呈现的状态只有一种, 但对不同的人-机界面, 取值有所不同。取值是基于不同转移路径, 采用专家判断与核电厂的实践经验进行结合, 得到表 6。

根据表 5、表 6 与式 (9), 可得到每次转移 $P(decision_t)$ 的值 (表 7)。

Succ_Tranfer_path_probility(t,t+1) 的计算结果。根据表 4、表 7 及式 (5), 得到每条转移路径的成功率 (表 8)。

(6) Max(t+1,n)。选择一个预测转移率最大的作为下一转移目标, 根据表 8 得最大值为 0.998。

表 3 父节点与几个子节点实验得到的参数值

Table 3 Parameter Values of Parent Node and Some Child Nodes Obtained from Experiment

a→b		a→c		a→d		a→e		a→f	
$F_p(t)$	Δt								
0.0008	29	0.0001	20	0.005	47	0.003	39	0.001	35

表 4 父节点与每个子节点的 $P(rask_{t+1}|rask_t)$ 的计算结果

Table 4 Results of $P(rask_{t+1}|rask_t)$ Value of Node Pair (Parent Node with a Child Node)

转移路径	a→b	a→c	a→d	a→e	a→f
$P(rask_{t+1} rask_t)$ 的值	0.023	0.002	0.265	0.124	0.035

表 5 因子 d_1 、 d_2 、 d_5 、 d_6 失误率取值及各状态的乘积和

Table 5 Error Probability of Factor d_1, d_2, d_5 and d_6 , and Their Sum of Products of Different State

d_1			$j=1$	$j=2$	$j=3$	d_2		
			0.25	0.002	0.001			
Decision	$j=1$	0.1	0.025	0.00004	0.00001	$j=1$	0.01	0.001
	$j=2$	0.02	$P(decision/d_1) = 0.02505$			$j=2$	0.02	0.001
	$j=3$	0.01				$P(decision/d_2) = 0.00343$		
d_5			$j=1$	$j=2$	$j=3$			
			0.03	0.01	0.003	$j=1$	1.0	0.1
Decision	$j=1$	0.1	0.003	0.0002	0.00003	$j=2$	0.1	0.002
	$j=2$	0.02	$P(decision/d_5) = 0.00323$			$j=3$	0.002	0.0001
	$j=3$	0.01				$P(decision/d_6) = 0.1021$		

注: $j=1,2,3$ 分别表示状态为高、中、低

表 6 因子 d_3 、 d_4 的不同路径失误率取值

Table 6 Error Probability of Factor d_3 and d_4 in Different Paths

转移路径	a→b	a→c	a→d	a→e	a→f
$P(decision/d_3)$	0.06	0.001	0.9	0.6	0.2
$P(decision/d_4)$	0.001	0.005	0.1	0.08	0.04

表 7 P(decision_t)的失误差率
Table 7 Error Probability of P(decision_t)

转移路径	a→b	a→c	a→d	a→e	a→f
P(decision _t)	0.1948	0.13981	1.13381	0.8138	0.3738

表 8 每条转移路径的成功概
Table 8 Success Probability of Each Transfer Path

转移路径	a→b	a→c	a→d	a→e	a→f
Succ_Tranfer_path_ probability(t,t+1)	0.996	0.998	0.7	0.899	0.987

(7) Transfer_route(t+1)。根据第(6)步,可以得到下一个转移目标是:(a)→(c),即:父节点画面(a)转移到子节点画面(c)(即3K00119YMA画面)。

(8) END()。通过本文建立核电厂数字化人-机界面监视转移路径预测规划方法,成功地预测到操纵员处理SGTR事故过程中监视3K00118YMA画面中的转移路径。该预测结果与某核电厂现行的SGTR事故处理规程(SOP)中给出的相应操纵指令路径,及其操纵员在模拟机上处理SGTR事故操纵录像的观察与眼动分析结果都一致。

5 结束语

本文针对核电厂数字化人-机界面监视活动,提出了对下一个监视目标的路径预测规划方法,包括规划模型、执行流程与关键算法等。将该方法应用于数字化核电厂SGTR事件,获得了监视转移预测路径,且计算结果与实际一致。该方法可为预防操纵员监视行为失误提供策略,提高监视转移可靠性与绩效,且可为剖析操纵员监视活动驱动机制、监视行为的仿真训练与人-机界面优

化提供支持,对核电厂防人因失误与提高操纵员监视绩效具有重要意义。

参考文献:

- [1] 高婷. c2c 电子商务模式下顾客满意度的灰色关联度评价[J]. 现代商贸工业, 2011, 24: 368-369.
- [2] 郑玉华, 罗东坤. 基于效用理论的石油工程项目风险灰色关联度评价[J]. 项目管理技术, 2011, 9(4): 100-103.
- [3] 崔其文, 解福. 改进的领域本体概念语义相似度计算方法[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(2): 173-175.
- [4] 冉景江, 赵燮京, 梁川. 基于加权马尔可夫链的降水预测应用研究[J]. 人民黄河, 2006, 28(4): 32-34.
- [5] Jiang J J, Zhang L, Wang Yq, et al. Markov Reliability Model Research of Monitoring Process in Digital Main Control Room of Nuclear Power Plant[J]. Safety Science, 2011, 49(6): 843-851.
- [6] 蒋建军, 张力, 王以群, 等. 考虑人因的核电厂主控室认知可靠性模型研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(1): 66-73.
- [7] Shen S H, Smidts C, Mosleh A. A Methodoloty for Collection and Analysis of Human Error Data Based on a Cognitive Model:IDA[J]. Nuclear Engineering and Design, 1997,172: 157-186
- [8] Massimo B. Assessment of Human Reliability Factors: A Fuzzy Cognitive Maps Approach[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37: 405-413.
- [9] Chang Y H J, Mosleh A . Cognitive Modeling and Dynamic Probabilistic Simulation of Operating Crew Response to Complex System Accidents. Part 2:IDAC Performance Influencing Factors Model[J]. Reliability Engineering and System Safety,2007,92(8):1014-1040.
- [10] Chang Y H J, Mosleh A. Cognitive modeling and Dynamic Probabilistic Simulation of Operating Crew Response to Complex System Accidents. Part 4: IDAC Causal Model of Operator Problem-Solving Response[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(8): 1061-1075
- [11] Mahadevan S, Zhang R X, Smith Natasha. Bayesian Network for System Reliability Reassessment[J]. Structural Safety, 2001, 23: 231-251.

Visual Monitoring Path Forecasting Method for Digital Human-Computer Interface in Nuclear Power Plant and Its Application

Hu Hong^{1,2}, Zhang Li^{2,3}, Jiang Jianjun³, Yi Cannan²,
Dai Licao³, Chen Qingqing²

1 College of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China;
2, Ergonomics and safety management Institute, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan, 421001, China;
3 Human Factors Institute, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China

Abstract: Sometimes, the operators can not judge next possible monitoring object which would lead to monitoring delay or transfer error in the monitoring digital human-computer interface parameter information process in nuclear power plant. Aiming at the situation, the forecasting path plan method including forecasting path model, forecasting path plan algorithm and the calculation method of transfer path success probability and which is based on Markov process was proposed. Then the monitoring transfer behavior of the operators when SGTR(Stream Generator Tube Rupture) occurred abruption accidents is analyzed based on the method proposed in this paper, taking the digital human-computer as the source node of monitoring task of t time, the transfer path of next monitoring object was obtained successfully to improve the efficiency of monitoring and to minimize the risk of monitoring error, which will also contribute to analyze the driving mechanism of operators' monitoring activities, to train simulated for monitoring behavior, and to optimize the digital man-machine interface.

Key words: Nuclear power plant, Digital human-computer interface, Monitoring transfer, Forecasting path, Markov process

作者简介:

胡 鸿 (1979—), 男, 讲师。南华大学核技术及应用专业在读博士研究生, 研究方向为人因工程与系统安全分析等。

张 力 (1955—), 男, 教授, 博士研究生导师。2004 年毕业于湖南大学管理科学与工程专业, 获博士学位。主要研究方向为人因工程、系统安全分析与评价等。

蒋建军 (1977—), 男, 讲师。2012 年毕业于南华大学核科学技术学院核技术及应用专业, 获博士学位。现主要从事人因工程和数据挖掘研究。

(责任编辑: 张明军)