

## 核反应堆非能动系统物理过程敏感参数识别的迭代法\*

郭海宽<sup>1,2</sup>, 赵新文<sup>1</sup>, 蔡琦<sup>1</sup>, 黄丽琴<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学核科学技术学院, 湖北武汉 430033; 2. 中国人民解放军92609部队, 北京 100077;  
3. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西南昌 330063)

**摘要:**核反应堆非能动系统参数敏感性分析是系统可靠性不确定性分析的重要组成部分。相关系数在刻画系统物理过程的成功准则参数敏感性方面存在缺陷, 针对此问题提出迭代法, 其综合了输入参数与成功准则的相关系数、偏相关系数以及输入参数之间的相关系数三方面信息, 通过实例验证方法的正确性和实用性。迭代法适合分析参数对成功准则的偏相关性, 能识别出更为精确的敏感参数, 为进一步提高非能动系统物理过程的可靠性提供参考依据。

**关键词:**相关系数; 偏相关系数; 敏感性分析; 成功准则; 物理过程; 非能动系统

**中图分类号:** TL364 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)02-168-07

## Iterative method on recognition of sensitive parameter for nuclear reactor passive system physical progress

GUO Haikuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Xinwen<sup>1</sup>, CAI Qi<sup>1</sup>, HUANG Liqin<sup>3</sup>

(1. College of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;  
2. The PLA Unit 92609, Beijing 100077, China;  
3. Material Science and Engineering Academy, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Parameter sensitivity analysis of nuclear reactor passive system is the main part of uncertainty analysis for passive system reliability. There are drawbacks for correlation coefficient to describe the parameter sensitivity of success criteria of passive system physical progress. So an iterative method was proposed, the method took account of correlation coefficient and partial correlation coefficient for input parameters, success criteria and correlation coefficient between parameters comprehensively, and the validity and practicability of the method were verified by a specific case. It is suitable for iterative method to analyze partial correlation of success criteria, to recognize more accurate sensitivity parameters and to provide reference for improving reliability of passive system physical process.

**Key words:** correlation coefficient; partial correlation coefficient; sensitivity analysis; success criteria; physical process; passive system

概率安全评价 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) 的不确定性分析和敏感性分析是研究非能动系统可靠性的有效方法<sup>[1-2]</sup>, 非能动系统敏感性分析是评价系统输入参数的不确定性对系统输出不确定性的贡献率<sup>[3-4]</sup>, 实际上是分析特定输入参数及其初始值发生变化对系统物理过程成功准则的影响<sup>[5-6]</sup>, 其结果具有重要的参考价值, 是工程决策的重要依据, 也是可行性研究报告和工程评估报告不可缺少的组成部分<sup>[7-8]</sup>。倪超<sup>[9]</sup>采用 Spearman 秩相关系数作为敏感性度量手段, 识别 AP1000 核电厂大破口失水事故下包壳峰值温度 (Peak Cladding Temperature, PCT) 的敏感参数; 张中伟<sup>[10]</sup>和黄昌

蕃<sup>[11]</sup>采用标准化回归系数表征各参数的敏感性影响, 识别系统成功准则的敏感参数; 文献[12-13]采用 Pearson 相关系数度量参数的敏感性, 识别成功准则的敏感参数。

综上所述, 目前刻画参数敏感性所采用的相关系数 (Spearman 秩相关系数、标准化回归系数、Pearson 相关系数), 仅反映单个输入参数与系统物理过程成功准则的线性关系。而系统不是单输入参数, 并且成功准则不止与一个输入参数具有线性关系, 可能同时与多个参数存在相关性, 即不只是单个参数影响成功准则而是多个参数同时制约其变化。成功准则与每个敏感参数既表现出相关联又有不确定的“特殊”关系, 是多个输入参数

\* 收稿日期: 2017-02-15

基金项目: 核反应堆系统设计技术国家重点实验室基金资助项目 (HT-JXYY-02-2014002); 海军工程大学自主立项基金资助项目 (20161601)

作者简介: 郭海宽 (1988—), 男, 河北邢台人, 助理研究员, 博士, E-mail: ghk\_1988@163.com

共同作用的结果。至于这种“共同作用”如何协同显现,每个输入参数扮演什么角色、发挥多大作用,由输入参数组成的系统决定,是系统的“内在”规律。由于相关系数没有把输入参数置于多参数“共同作用”的重要前提下考虑,所以只能反映单个参数与成功准则的“外在”表征,无法表现输入参数在多参数“共同作用”前提下与成功准则的新相关程度。

针对相关系数在刻画参数敏感性方面的缺陷,本文基于偏相关系数提出迭代法,其综合三方面信息:输入参数与成功准则的相关系数、偏相关系数以及输入参数之间的相关系数,可全面准确地分析输入参数的敏感性,科学判定其

与成功准则的相关性,合理解释敏感参数的判定结果。迭代法更为精确地判定参数敏感性,对降低参数识别的维数,提高识别效率具有重要意义。

### 1 基于相关系数识别 PCT 的敏感参数

本文以 AP1000 丧失正常给水事故为研究对象,设定 PCT 为成功准则<sup>[14-15]</sup>。分析非能动余热排出系统 (Passive Residual Heat Removal System, PRHRS) 物理过程的参数敏感性,主要研究输入参数对 PCT 准则的线性相关性,其分析过程如图 1 所示,重点研究内容集中在第六步敏感参数的识别。

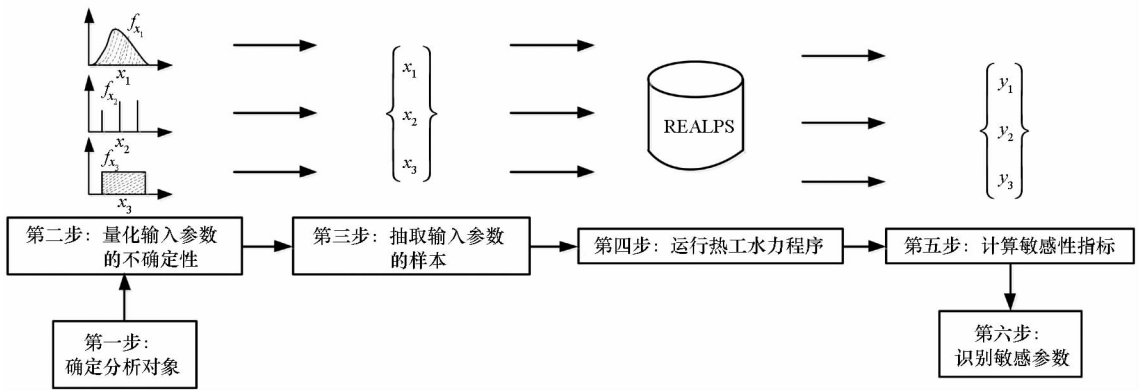


图 1 PRHRS 物理过程成功准则的参数敏感性分析示意图

Fig. 1 Parameter sensitivity analysis diagram of PRHRS physical phenomena success criteria

传统方法分析 PCT 输入参数敏感性,需根据相关系数判断参数是否与 PCT 存在线性相关性,唯一的判定依据是相关系数值,具体实施方式有以下两种。

① 相关  $\leftarrow P > P_{\text{阈值}} > P \Rightarrow$  不相关

②  $\begin{matrix} \rightarrow \text{强相关} \leftarrow P > P_{\text{阈值A}} \\ P_{\text{阈值A}} > P > P_{\text{阈值B}} \\ \downarrow \\ \text{中度相关} \\ \rightarrow P_{\text{阈值B}} > P \Rightarrow \text{不相关} \end{matrix}$

使用 Pearson 相关系数 (简称相关系数) 描述参数与 PCT 的线性关系,计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中,  $n$  为工况总数,  $x_i$  为第  $i$  个工况的输入参数值,  $y_i$  为第  $i$  个工况的 PCT。Pearson 相关系数又称线性相关系数、积差相关系数,适用于满足正态

分布的数据,取值范围在  $(-1, 1)$  之间,绝对值越大相关性越强,取值符号表示相关性方向。

根据文献 [9, 11, 16 - 17] 所采用的 AP1000 重要输入参数及不确定性分布,经与安全分析报告的参数设计值对比并征求多位专家意见,最终形成本文采用的输入参数及不确定性分布,见表 1。

利用拉丁超立方抽样方法<sup>[18]</sup>,在输入参数取值范围内抽取 188 组参数样本,得到稳态或瞬态模型不确定性传递计算的输入参数组合。其中每一组由 27 个输入参数组成,对应一组 RELAP5 程序输入。参数样本带入 RELAP5 程序运行,得到对应工况下的 PCT,参数组合与对应的 PCT 代入式 (1),得到输入参数的相关系数。应用传统法判定参数与 PCT 是否存在相关性,设定相关系数阈值为 0.1,最终判定 9 个参数与 PCT 具有线性关系,其结果如表 2 所示。

表 1 输入参数及不确定性分布

Tab. 1 Input parameters and their uncertainty distribution

序号	参数	单位	分布
1	CMT2#隔离阀能阻系数		正态(0.44,0.56)
2	HX 水平管径	m	正态(0.015 75,0.002)
3	二次侧(给水)初始温度	K	均匀(494.85,504.85)
4	HX 有效总流通面积	m <sup>2</sup>	均匀(0.124 168,0.144 168)
5	反应堆总功率	MW <sub>t</sub>	均匀(3366,3434)
6	稳压器压力	MPa	均匀(15.19,15.81)
7	CMT 水温	K	均匀(300,344.1)
8	IRWST 温度 - N <sup>①</sup>	K	均匀(300,344.1)
9	IRWST 温度 - F <sup>②</sup>	K	均匀(306,350.1)
10	HX 水平管长度	m	均匀(3.0,3.4)
11	HX 进口能阻系数		均匀(0.24,0.3)
12	HX 出口能阻系数		均匀(0.24,0.3)
13	一次侧初始温度	K	均匀(569.87,578.21)
14	HX 垂直管径	m	均匀(0.018,0.020)
15	HX 热交换面积 - 外径水平段	m <sup>2</sup>	根据管数、长度、外径得到
16	HX 热交换面积 - 外径垂直段	m <sup>2</sup>	根据管数、长度、外径得到
17	HX 热交换面积 - 内径水平段	m <sup>2</sup>	根据管数、长度、内径得到
18	HX 热交换面积 - 内径垂直段	m <sup>2</sup>	根据管数、长度、内径得到
19	轴向功率分布 $P_{BOT}$		均匀(0.9,1.1) - 变化因子
20	轴向功率分布 $P_{MID}$		均匀(0.9,1.1) - 变化因子
21	CMT 管线能阻系数		均匀(0.8,1.2) - 变化因子
22	燃料导热率	W/(m·K)	正态(1,1.1) - 变化因子
23	CMT1#隔离阀能阻系数		正态(0.88,1.12) - 变化因子
24	衰变热	MW <sub>t</sub>	正态(0.88,1.12) - 变化因子
25	SG 回路能阻系数		均匀(0.9,1.1) - 变化因子
26	HX 水平管总长度	m	根据管数、单管长度得到
27	HX 管数	个	均匀(620,750)

注:①IRWST 温度 - N;HX 附近区域 IRWST 的温度;②IRWST 温度 - F;HX 较远区域 IRWST 的温度。

表 2 传统法判定与 PCT 存在相关性的参数

Tab. 2 Parameters having correlation with PCT judging by traditional method

参 数	相关系数
IRWST 温度 - N	0.116
HX 出口能阻系数	0.132
HX 垂直管径	-0.237
HX 热交换面积 - 外径垂直段	-0.217
HX 热交换面积 - 内径垂直段	-0.217
轴向分布功率 $P_{BOT}$	0.288
轴向分布功率 $P_{MID}$	0.215
HX 水平管总长度	-0.105

PCT 参数敏感性分析的目的是通过输入参数的敏感性系数值,删除与 PCT 弱相关的参数,重

点考虑强相关的参数。如何根据敏感性系数确定哪些输入参数是强相关的,哪些又是弱相关的,选用什么标准或指标衡量敏感性的显著性,仍是有待深入研究的问题。目前此方面的研究较少<sup>[19]</sup>,基本以经验规则或人为设定相关系数阈值为标准,判定输入参数与 PCT 的相关性,传统方法过于简单粗略,有待细化、精准化。

## 2 基于偏相关系数识别 PCT 的敏感参数

### 2.1 迭代法

相关系数刻画参数敏感性时存在局限性,实际中不能仅根据相关系数盲目判定输入参数与 PCT 是否具有线性关系,必须考虑第三个参数或更多参数对所关注参数的影响。

偏相关系数描述在控制一个或几个输入参

数的条件下,所关注的输入参数与物理过程成功准则之间的相关程度<sup>[20]</sup>,反映了输入参数与成功准则之间的净相关性。假设控制输入参数  $Z$ ,则参数  $X$  与成功准则  $Y$  之间的偏相关系数为<sup>[21-22]</sup>:

$$r_{XY,Z} = \frac{r_{XY} - r_{XZ}r_{YZ}}{\sqrt{(1-r_{XZ}^2)(1-r_{YZ}^2)}} \quad (2)$$

式中, $r_{XY,Z}$ 表示固定输入参数  $Z$  时,参数  $X$  与成功准则  $Y$  之间的偏相关系数, $r_{XZ}$ 、 $r_{YZ}$  分别表示参数  $X$  与参数  $Z$  以及参数  $Z$  与成功准则之间的相关系数。对偏相关系数进行显著性检验,检验统计量为:

$$t = \frac{\sqrt{n-k-2} \cdot r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

式中, $r$  是对应的偏相关系数, $n$  为工况数, $k$  为输入参数个数。

虽然相关系数和偏相关系数均可以表示输入参数与成功准则的线性关系,但其物理意义有差异,如图2所示。

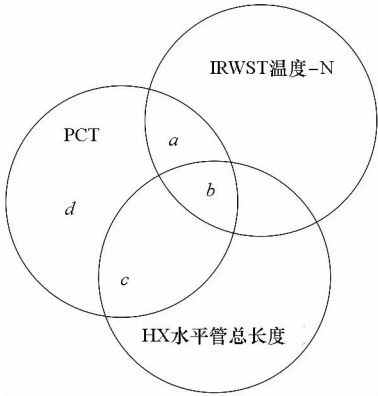


图2 相关系数与偏相关系数物理意义的差异

Fig.2 Physical difference of correlation coefficient and partial correlation coefficient

图2中  $(a+b)/(a+b+c+d)$  表示由 IRWST 温度 - N 解释的 PCT 变异量的比例。若令  $r_{y1}$  表示 IRWST 温度 - N 与 PCT 的相关系数,则  $r_{y1}^2 = (a+b)/(a+b+c+d)$ 。另一方面, $a$  是在 IRWST 温度 - N 和 PCT 的重叠面积中扣除 HX 水平管总长度重叠部分后的剩余面积, $a/(a+b+c+d)$  是  $a+b$  扣除 HX 水平管总长度可以解释的部分后,单独由 IRWST 温度 - N 解释的 PCT 变异量的比例。若令  $sr_{y1}$  表示 IRWST 温度 - N 和 PCT 之间的偏相关系数,则  $sr_{y1}^2 = a/(a+b+c+d)$ 。

分析 IRWST 温度 - N 的偏相关性,结果见

表3。

表3 IRWST 温度 - N 的偏相关性分析

Tab.3 Partial correlation analysis of IRWST temperature-N

参数	相关系数	偏相关系数	HX 水平管总长度的相关系数
IRWST 温度 - N	0.116	0.031	0.100

与 IRWST 温度 - N 存在相关性的参数不单有 HX 水平管总长度,但表3只分析与 HX 水平管总长度的相关性,原因:根据图2可知,只有 PCT 的敏感参数才会影响 IRWST 温度 - N 与 PCT 的重叠面积(相关性),而与 PCT 不具有线性关系的参数不会影响 IRWST 温度 - N 与 PCT 的相关性,所以显著性检验法判定与 PCT 存在相关性符合要求的参数只有 HX 水平管总长度。由表3可知,IRWST 温度 - N 与 PCT 的相关系数为 0.116,有较大负相关性,分析偏相关性可得偏相关系数为 0.031,至此能够推断 IRWST 温度 - N 与 PCT 不存在相关性。相关性指标值出现巨变的原因:HX 水平管总长度与 IRWST 温度 - N 具有较大重叠面积,相关系数为 0.100;IRWST 温度 - N 与 PCT 的相关性受到 HX 水平管总长度的影响,当扣除 IRWST 温度 - N 与 HX 水平管总长度的重叠部分后,相关性指标值变小,与 PCT 的相关性减弱,由相关变为不相关。

综上所述,全面准确地分析输入参数的敏感性、科学判定与成功准则的相关性,必须综合三方面信息:输入参数与成功准则的相关系数;输入参数与成功准则的偏相关系数;输入参数之间的相关系数。

综合以上三方面信息提出迭代法解决基于相关系数识别敏感参数存在的问题,方法示意图如图3所示。

### 2.2 迭代法识别 PCT 的敏感参数

设定阈值为 0.1,判断参数之间的相关性,分别得到每一个参数与其余参数之间的相关性情况可知,HX 水平管总长度与轴向分布功率  $P_{Bot}$  存在线性关系,控制  $P_{Bot}$  效应的同时分析 HX 水平管总长度与 PCT 之间的偏相关性,结果如表4所示。

表 5 迭代结束后与 PCT 存在相关性的参数

Tab.5 Parameters existing correlation with PCT after iteration

编号	参数	相关系数	偏相关系数
1	二次侧初始温度	-0.095	-0.101
2	反应堆总功率	-0.046	-0.092
3	HX 垂直管径	-0.237	-0.155
4	HX 热交换面积 - 外径垂直段	-0.217	-0.158
5	HX 热交换面积 - 内径垂直段	-0.217	-0.158
6	轴向分布功率 $P_{BOT}$	0.288	0.300
7	轴向分布功率 $P_{MID}$	0.215	0.615
8	CMT1#隔离阀能阻系数	0.031	0.147
9	SG 回路能阻系数	0.067	0.120

观察表 5 发现轴向分布功率  $P_{MID}$  迭代结束前后的相关性指标相差较大,原因在于:HX 垂直管径与  $P_{MID}$  表现相关性,可能是  $P_{MID}$  的压抑参数,压制了  $P_{MID}$  与 PCT 的相关性;扣除 HX 垂直管径的影响后,分析  $P_{MID}$  与 PCT 的偏相关性,相关性指标变大且相关性增强,可推知 HX 垂直管径的确是  $P_{MID}$  的压抑参数。分析输入参数与成功准则的相关性时,不仅要考虑参数的偏相关系数,还应综合参数与成功准则及参数间的相关系数,只有综合三方面信息才能正确识别输入参数的敏感性。

就 PCT 而言,轴向分布功率  $P_{BOT}$ 、轴向分布功率  $P_{MID}$ 、CMT1#隔离阀能阻系数、SG 回路能阻系数的偏相关系数为正,参数值越小,PCT 值越低,PRHRS 物理过程的可靠性越高;其余参数的偏相关系数为负,参数越大,PCT 值越低,物理过程的可靠性越高。所有参数中只有轴向分布功率  $P_{BOT}$ 、轴向分布功率  $P_{MID}$  等参数的偏相关系数绝对值大于 0.2,其余参数均小于 0.2,  $P_{MID}$  的绝对值最大,为 -0.615。

### 3 两种方法的对比

#### 3.1 识别的参数结果对比

对比表 2 和表 5 可知,迭代法分析 9 个参数与 PCT 具有线性关系,比传统法多 1 个参数。迭代法相比传统法增加的参数为:二次侧初始温度、反应堆总功率、CMT1#隔离阀能阻系数和 SG 回路能阻系数;删除的参数有:IRWST 温度 - N、HX 出口能阻系数、HX 水平管总长度。迭代法增加或删除参数原因:其以参数之间的相关性为基础,分析参数的偏相关性,即控制附加参数效应的同

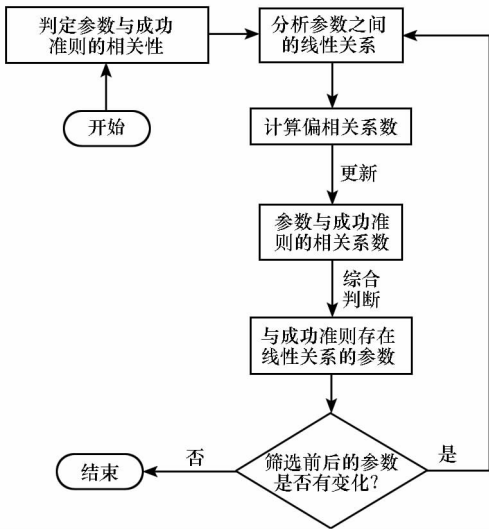


图 3 迭代法示意图

Fig.3 Schematic diagram of iterative method

表 4 HX 水平管总长度与 PCT 之间的偏相关性

Tab.4 Partial correlation between HX total length of horizontal pipe and PCT

控制参数	参数	PCT	显著性
无	HX 水平管总长度	-0.105	0.072
$P_{BOT}$	HX 水平管总长度	-0.016	0.761

观察表 4 可知,不控制轴向分布功率  $P_{BOT}$  的效应时,HX 水平管总长度与 PCT 之间的相关性呈负相关,相关系数为 -0.105;但  $P_{BOT}$  的效应后,HX 水平管总长度的偏相关系数为 -0.016,与 PCT 不存在相关性( $p = 0.761 > 0.05$ )。可推知尽管 HX 水平管总长度和 PCT 表面上负相关,但是由于它们的相关系数未能超过整个系统带来的阈值—— $P_{BOT}$  与 PCT 的相关系数、两个参数间的相关系数,或者说,HX 水平管总长度与 PCT 的相关程度不足以克服  $P_{BOT}$  的相关影响,因而使表面的负相关在系统内部实际上表现为不相关的情形,这就是 HX 水平管总长度与 PCT 内在的本质联系。只有偏相关系数才能真正反映输入参数与成功准则的本质联系,所以不能简单地判断 HX 水平管总长度与 PCT 之间是否存在线性关系,结论应该为在控制  $P_{BOT}$  不变的情况下,HX 水平管总长度与 PCT 之间不存在显著的线性关系。

按示意图 3 应用迭代法识别与 PCT 均线性关系的参数,迭代结束后判定的与 PCT 存在线性关系的参数见表 5。

时计算参数的偏相关系数,此系数能真正反映参数与 PCT 之间的线性关系;传统法独立计算单个参数对 PCT 的相关系数,而实际应用中往往因为第三个参数或更多参数的影响,使得相关系数不能真正反映指定参数与 PCT 之间的线性相关程度,所以传统法误认为与 PCT 存在相关性的参数,由迭代法将其删除,而传统法不能识别的与 PCT 存在相关性的参数,又由迭代法将其纳入到与 PCT 存在相关性的参数行列。

### 3.2 识别的参数效果对比

对比传统法和迭代法分析的与 PCT 存在相关性的参数效果,对比方案为:全参数样本中分别仅留下传统法和迭代法判定的与 PCT 存在相关性的参数,将两种方法对应的参数样本分别作为输入参数组合再次代入 RELAP5 程序,得到相应工况的 PCT。对比指标为平均距离,其计算公式为:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_{\text{全}i}| \quad (4)$$

式中, $n$  为工况数, $y_i$  为传统方法或迭代法第  $i$  个工况下的 PCT, $y_{\text{全}i}$  为全参数第  $i$  个工况下的 PCT。

两种方法的 PCT 代入式(4)计算平均距离,得到传统法距离为 1.096,大于迭代法距离 0.090,这说明传统法删除的参数中存在对 PCT 有影响的参数,以及将对 PCT 影响微弱或无影响的部分参数纳入与 PCT 存在相关性的行列,使得 PCT 与全参数偏差较大。相比传统法,这迭代法分析参数的偏相关性,即控制附加参数效应的同时计算参数的偏相关系数,能真正反映参数与 PCT 之间的线性关系,得到的平均距离小于传统法,这说明迭代法相比传统法可以更准确地识别与 PCT 存在相关性的参数,保留对 PCT 影响较大的参数,删除影响较小的参数,所以应采用迭代法分析参数偏相关性,判定与 PCT 的线性关系。

## 4 结论

本文分析核反应堆 PRHRS 物理过程的敏感性,研究输入参数对 PCT 准则的线性相关性,重点是敏感参数的识别。传统法采用相关系数刻画参数敏感性,只能反映单个参数与成功准则的“外在”表征,无法表现输入参数在多参数“共同作用”前提下与成功准则的新相关程度。针对相关系数的缺陷,本文基于偏相关系数提出迭代法分析输入参数对成功准则的敏感性。迭代法综合了输入参数与成功准则的相关系数、偏相关系数以及参数之间的相关系数三方面信息,在 PCT 准

则下验证了迭代法的适用性,不仅可以全面分析输入参数的敏感性,还可以完整深入地解释敏感参数的判定结果。迭代法适合分析成功准则的参数敏感性,得到精确的敏感参数,对降低参数识别的维数,提高识别效率具有重要意义,是工程决策的重要依据,为将来提高核反应堆非能动系统物理过程可靠性提供可信依据。

## 参考文献 (References)

- [1] 扈本学,王喆,王国栋,等. 基于抽样的不确定性及敏感性分析的方法在核电厂水膜蒸发试验误差分析中的应用[J]. 核安全, 2016, 15(1): 84-94.  
HU Benxue, WANG Zhe, WANG Guodong, et al. Application of the sampling-based uncertainty and sensitivity analysis method in error analysis of heated flat plate test at NPP [J]. Nuclear Safety, 2016, 15(1): 84-94. (in Chinese)
- [2] 丁虎. 研发核电站 PSA 软件中不确定性和敏感性分析功能模块[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 1-2.  
DING Hu. Development of the uncertainty and the sensitivity analysis function module in the nuclear power station PSA software [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 1-2. (in Chinese)
- [3] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, et al. Sensitivity analysis in practice a guide to assessing scientific models [M]. USA: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [4] Helton J C, Davis F J. Illustration of sampling based methods for uncertainty [J]. Risk Analysis, 2002, 22(3): 591-622.
- [5] Lofaro R J. Understanding aging in containment cooling systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 1996, 163(3): 301-314.
- [6] Borgonovo E, Apostolakis G E, Tarantola S, et al. Comparison of global sensitivity analysis techniques and importance measures in PSA [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 79(2): 175-185.
- [7] Hirschberg S. Human reliability analysis in probabilistic safety assessment for nuclear power plants [J]. Nuclear Safety, 2004.
- [8] 陈炼,胡啸,邓程程,等. 最佳估算方法中不确定度评估关键问题分析[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(5): 851-858.  
CHEN Lian, HU Xiao, DENG Chengcheng, et al. Analysis on key issue of uncertainty evaluation in best estimate method [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(5): 851-858. (in Chinese)
- [9] 倪超. AP1000 核电厂大破口失水事故最佳估算分析建模与不确定性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 47-80.  
NI Chao. Modeling of AP1000 nuclear power plant LB-LOCA best estimate analysis and uncertainty study [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 47-80. (in Chinese)
- [10] 张中伟. 保守分析与最佳估算相结合之 LOCA 认证分析

- 方法论[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 46-65.  
ZHANG Zhongwei. Deterministic-realistic hybrid methodology (DRHM) for LOCA licensing analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 46-65. (in Chinese)
- [11] 黄昌蕃. 非能动安全系统可靠性评估方法初步研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 12-13.  
HUANG Changfan. Preliminary investigation on reliability assessment of passive safety system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 12-13. (in Chinese)
- [12] 王成龙, HU Linwen, 秋穗正, 等. 可移动式熔盐冷却高温堆(TFHR)热工水力特性不确定性分析[C]//第十四届热工流体会议论文集, 2015.  
WANG Chenglong, HU Linwen, QIU Huizheng, et al. Uncertainty analysis of transportable fluoride-salt-cooled high temperature reactor (TFHR) [C]//Proceeding of the 14th Thermal Engineering Fluid Conference, 2015. (in Chinese)
- [13] Gertman A E, Mesina G L. Uncertainty analysis of RELAP5-3D; INL/EXT-12-26182 [R]. Idaho National Laboratory, 2012.
- [14] 孙汉虹. 第三代核电技术 AP1000[M]. 2 版. 北京: 国家电力出版社, 2016: 34-78.  
SUN Hanhong. The third generation nuclear technology AP1000[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 34-78. (in Chinese)
- [15] 林诚格. 非能动安全先进核电厂 AP1000 [M]. 北京: 原子能出版社, 2008.  
LIN Chengge. Passive safety advanced nuclear plant AP1000 [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 张顺香. AP1000 电厂状态参数不确定性对 LBLOCA 影响的量化分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 41-51.  
ZHANG Shunxiang. Uncertainty analysis of the effect of plant state parameter on LB-LOCA in AP1000 [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 41-51. (in Chinese)
- [17] 刘强. 基于神经网络方法的 AP1000 非能动系统可靠性分析[D]. 北京: 清华大学, 2014: 48-61.  
LIU Qiang. Reliability analysis of AP1000 passive system based on artificial neural networks [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 48-61. (in Chinese)
- [18] Imam R L, Conover W J. Small sample sensitivity analysis techniques for computer models with an application to risk assessment [J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 1980, 9(17): 1749-1842.
- [19] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16.  
CAI Yi, XING Yan, HU Dan. On sensitivity analysis [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2008, 44(1): 9-16. (in Chinese)
- [20] 王黎明, 陈颖, 杨楠. 应用回归分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2008: 65-66.  
WANG Liming, CHEN Ying, YANG Nan. Applied regression analysis [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2008: 65-66. (in Chinese)
- [21] 罗伯特 S. 平狄克, 丹尼尔 L. 鲁宾费尔德. 计量经济模型与经济预测[M]. 4 版. 钱小军, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 57-65.  
Pindyck R S, Rubinfeld D L. Econometric Models and Economic Forecasts [M]. 4th ed. Translated by QIAN Xiaojun. Beijing: China Machine Press, 2005: 57-65. (in Chinese)
- [22] 何晓群. 多元统计分析 [M]. 2 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2010: 12-15.  
HE Xiaojun. Multivariate statistical analysis [M]. 2nd ed. Beijing: China Renmin University Press, 2010: 12-15. (in Chinese)