

# 基于基准题的中子扩散程序 蜕变测试验证方法

阳小华<sup>1,2</sup>, 闫仕宇<sup>1,2,\*</sup>, 李萌<sup>2</sup>, 于涛<sup>2</sup>, 谢金森<sup>2</sup>, 刘朝晖<sup>1,2</sup>, 刘华<sup>2</sup>

(1. 南华大学 计算机科学与技术学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 中核集团高可信计算重点学科实验室, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**基准题计算是核电设计与安全分析软件验证测试的主要方式之一,但其存在研制成本高、周期长、题量少的问题。本文针对中子扩散程序提出一种新型测试方法,即以基准题作为原始测试用例,依据物理模型蕴含的蜕变关系,生成衍生测试用例,进行蜕变测试验证。实例表明该方法不但可扩充基准题数量,还能提高测试的充分性,是一种很有应用前景的验证测试方法。

**关键词:**核电设计软件;中子扩散程序;验证;蜕变测试

中图分类号:TL339

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2017)07-1239-05

doi:10.7538/yzk.2017.51.07.1239

## Verification Method of Metamorphic Test on Neutron Diffusion Program Based on Benchmark Problem

YANG Xiao-hua<sup>1,2</sup>, YAN Shi-yu<sup>1,2,\*</sup>, LI Meng<sup>2</sup>, YU Tao<sup>2</sup>,  
XIE Jin-sen<sup>2</sup>, LIU Zhao-hui<sup>1,2</sup>, LIU Hua<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. CNNC Key Laboratory on High Trusted Computing, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** The benchmark problem computation is one of the main ways on verification test of nuclear power design and safety analysis software, but it has shortcomings of high cost, long cycle, and small number of benchmark problems. A new test method for neutron diffusion program was proposed in this paper, which takes the existing benchmark problem for the original test cases, produces more follow-up test cases based on metamorphic relationships contained in the physical model, and carries out metamorphic test verification on software. The example shows that this method can not only extend the number of benchmark problems, but also improve the adequacy of the test. It is a promising method for verification test.

**Key words:** nuclear power design software; neutron diffusion program; verification; metamorphic test

收稿日期:2016-09-06;修回日期:2016-12-21

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(11575079)

作者简介:阳小华(1963—),男,湖南衡阳人,教授,博士,计算机软件专业

\* 通信作者:闫仕宇,E-mail: yanshiyu\_2008@163.com

核电设计与安全分析软件覆盖了反应堆物理计算、热工水力计算、安全分析、严重事故分析、燃料设计、力学分析等各类程序,其核心是模拟物理过程的科学计算程序。为真正用于实际的核电站设计,程序开发者必须解决一个问题:如何证明计算机软件的模拟过程是正确的<sup>[1]</sup>。验证和确认是解决这个问题的关键一步。

基准题计算是核电软件验证测试的主要方式之一,如,COSINE 软件包堆芯物理分析程序 CORE 采用 2D-IAEA 基准问题进行初步的验证计算<sup>[2]</sup>;LATC 组件参数计算程序的  $S_N$  模块采用 ISSA 基准题进行计算结果的比较<sup>[3]</sup>;软件研发机构通过加入国际实验研究计划和获取、购买国内外可用实验数据等途径,收集了一批 COSINE 模型评估所需的各类数据和基准题。但总体看来,获取数量充足的基准题是一项具有较大挑战性的工作。若能在已有基准题的基础上,产生更多的测试用例,对于提高验证测试的充分性、减低费用和提高效率是有意义的。本文将堆芯中子扩散程序为例探讨以基准题作为原始测试用例,依据物理模型蕴含的蜕变关系,生成衍生测试用例并进行蜕变测试的方法。

## 1 蜕变测试的概念

传统的软件测试技术通过比较测试用例的实际输出和预期输出是否相等来检验待测程序的正确性,但许多情况下,测试人员很难构造程序的预期输出,以确定执行结果与期望结果是否相同,这就是 oracle 问题。

为解决这个问题,Chen 等<sup>[4]</sup>提出了蜕变测试的概念,该方法认为测试过程中没有发现错误的测试用例也同样蕴涵着有用的信息,通过检查这些成功用例及由它们构造的新用例所对应的程序执行结果之间的关系可进一步测试程序,无需构造预期输出。

程序执行结果之间应满足的关系可根据程序的规约推导出来。假如程序  $P$  用来计算函数  $f$ ,那么  $f$  显然是  $P$  必需遵守的规约,判定程序正确性的关系可从  $f$  中推导出来。

定义<sup>[4]</sup> 假设程序  $P$  用来计算函数  $f(x)$ ,  $x_1, x_2, \dots, x_n (n > 1)$  是  $x$  的  $n$  组变元值,若  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之间满足关系  $r$  时,  $f(x_1), f(x_2),$

$\dots, f(x_n)$  满足关系  $R_f$ , 即:

$$r(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow R_f(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n))$$

则称  $(r, R_f)$  是  $P$  的蜕变关系。

显然,如果  $P$  正确,那么它一定满足:

$$r(I_1, I_2, \dots, I_n) \rightarrow R_f(P(I_1), P(I_2), \dots, P(I_n))$$

其中,  $I_1, I_2, \dots, I_n$  为程序  $P$  对应  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的输入。

下面以一个计算指数函数  $f(x) = e^x$  的程序  $P$  为例,详细说明蜕变测试过程。

1) 假设已有一个原始测试用例  $I_1 = 0.7$ 。

2) 依据目标函数  $f$  的性质构造蜕变关系  $e^x \cdot e^{-x} = 1$ , 据此关系,由原始测试用例得到衍生测试用例  $I_2 = -0.7$ 。

3) 程序  $P$  分别执行原始测试用例和衍生测试用例,得到执行结果  $P(0.7)$  和  $P(-0.7)$ 。

4) 根据蜕变关系,判定程序  $P$  的正确性。若  $P(0.7) \cdot P(-0.7) = 1$  成立,即满足蜕变关系,则程序  $P$  测试通过,否则说明程序  $P$  中存在错误。

蜕变测试技术起初主要应用于数值计算程序,如三角函数、指数函数、行列式等的计算程序及热力学偏微分方程求解程序<sup>[5]</sup>等。后来,Chen 等<sup>[6]</sup>指出任何包含多个输入输出的可预期关系均可作为蜕变关系。很快地,蜕变测试应用到最短路径程序、关键路径程序、计算机图形学等各种无预期值的情形<sup>[7-8]</sup>。

## 2 基于基准题的蜕变测试验证方法

由于穷尽测试是不可能的,所以测试必须设置结束条件,即充分性准则。充分性准则是决定一个软件系统是否被充分测试的规则。软件测试充分性准则使软件测试建立在客观的度量软件测试质量的基础上,是软件测试方法中的一个基本成分,具有如下重要作用:1) 定量地规定软件测试要求,度量软件测试质量;2) 指导测试数据的选择;3) 指导测试过程中对软件行为的观察和记录;4) 保证软件测试的质量,同时避免不必要的测试。

验证测试通常采用黑盒测试技术,包括等价类划分、边界值分析、判定表、因果图、正交测试、错误推测等方法,其中等价类划分是测试中

常用的方法。等价类测试的充分性准则可表述为:给定待测程序输入域上的等价关系  $\mathcal{R}$ , 将输入域划分成  $n$  个等价类  $EC = \{EC_1, EC_2, \dots, EC_n\}$ 。一个测试集  $TC = \{TC_1, TC_2, \dots, TC_m\}$  是充分的, 当且仅当对于任一个等价类  $EC_i$ , 在测试集  $TC$  均能找到一个元素  $TC_j$  属于  $EC_i$ 。

为使软件得到充分验证测试, 需足够的测试用例。若全部使用基准题, 将带来较大的代价, 而借助蜕变测试技术, 可在已有基准题的基础上生成大量的衍生测试用例, 从而以较小的代价达到测试充分性要求。因此, 提出如下的验证测试方法, 方法流程如图 1 所示。

- 1) 使用已有基准题作为原始测试用例进行验证测试, 如果通过, 则进行下一步;
- 2) 判断是否达到充分性准则要求, 如果未达到, 继续下一步;
- 3) 依据物理模型导出蜕变关系, 根据蜕变关系生成衍生基准题进行测试, 如果通过, 则返回到第 2 步。

### 3 堆芯中子扩散程序蜕变测试

文献[9]中, 为验证所开发的 HARMONY 程序的正确性, 对一维问题, 以文献[10]中的一维平板双群扩散基准题(SLAB\_1D\_2G)来验证程序输出的有效增殖因数  $k_{eff}$  和中子通量密度  $\phi$  的计算结果。其程序涉及的多群中子扩散方程模型为:

$$-\nabla D_g(r) \nabla \phi_g(r) + \Sigma_{t,g}(r) \phi_g(r) - \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g' \rightarrow g} \phi_{g'}(r) = \frac{1}{k_{eff}} \chi_g(r) \sum_{g'=1}^G (\nu \Sigma_{f,g'}) \phi_{g'}(r) \quad (1)$$

$g = 1, 2, \dots, G$

其中:  $D_g$  为  $g$  群扩散系数;  $\Sigma_{t,g}$  为  $g$  群宏观总截面;  $\Sigma_{g' \rightarrow g}$  为  $g'$  群向  $g$  群转移截面;  $\chi_g$  为  $g$  群裂变中子谱;  $\nu$  为平均裂变中子数;  $(\nu \Sigma_{f,g'})$  为第  $g'$  群平均裂变中子数与裂变截面的乘积;  $G$  为总能群数。

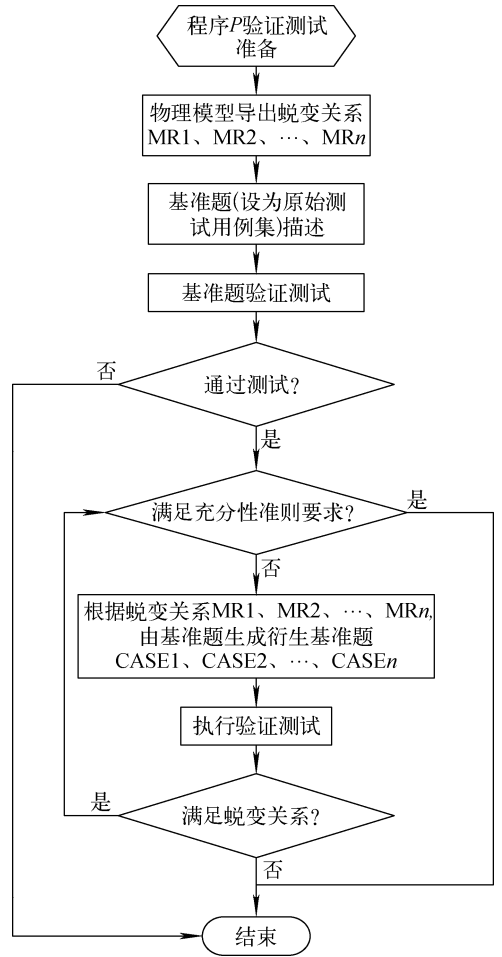


图 1 基于基准题的蜕变测试验证方法流程  
Fig.1 Verification method flow of metamorphic test based on benchmark problem

HARMONY 程序中子扩散方程求解器的输入参数为基准题几何参数与群常数, 输出参数为  $k_{eff}$  和  $\phi$ 。SLAB\_1D\_2G 基准题堆芯厚度为 450 cm, 计算中等分为 18 个离散节块, 堆芯双群常数列于表 1。

文献[9]计算的  $k_{eff} = 0.98699$  与文献[10]给出的参考结果 0.98698 的相对偏差为  $1.0132 \times 10^{-5}$ , 认为 HARMONY 程序的计算结果正确。

$k_{eff}$  通常可分为 3 种物理状态:  $k_{eff} > 1$  为超

表 1 SLAB\_1D\_2G 一维平板基准题参数<sup>[10]</sup>

Table 1 Parameter of SLAB\_1D\_2G one-dimensional tablet benchmark problem<sup>[10]</sup>

能群	$D/cm$	$\Sigma_t/cm^{-1}$	$\nu \Sigma_f/cm^{-1}$	$\chi$	$\Sigma_{1 \rightarrow 2}/cm^{-1}$
1	1.264	$8.154 \times 10^{-3}$	0.000	1.000	$7.368 \times 10^{-3}$
2	$9.328 \times 10^{-1}$	$4.100 \times 10^{-3}$	$4.562 \times 10^{-3}$	0.000	$7.368 \times 10^{-3}$

临界,  $k_{\text{eff}} < 1$  为次临界,  $k_{\text{eff}} = 1$  为临界。以此为依据, 可将输入域划分为 3 个等价类:  $k_{\text{eff}} > 1$  的子域,  $k_{\text{eff}} < 1$  的子域,  $k_{\text{eff}} = 1$  的子域。考虑计算误差的影响, 可只考虑  $k_{\text{eff}} > 1$  和  $k_{\text{eff}} < 1$  两个等价类。而文献[9]中程序验证只是采用了一类基准题( $k_{\text{eff}} < 1$ ), 而另一类( $k_{\text{eff}} > 1$ )情况没有验证。根据等价类测试的充分性准则, 验证测试是不充分的。

### 3.1 蜕变关系

根据多群中子扩散方程模型(式(1))具有的共轭、齐次等性质, 可推得程序  $P$  至少有 2 条蜕变关系 MR1、MR2。

#### 1) 蜕变关系 MR1

式(1)可简写成算符形式:

$$\mathbf{M}\Phi = \frac{1}{k_{\text{eff}}}\mathbf{F}\Phi \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{M}$  为包含泄漏、吸收和散射在内的中子消失算符;  $\Phi$  为中子通量密度向量;  $\mathbf{F}$  为中子裂变产生算符。定义式(2)的共轭方程为:

$$\mathbf{M}^* \Phi^* = \frac{1}{k_{\text{eff}}^*} \mathbf{F}^* \Phi^* \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{M}^*$  和  $\mathbf{F}^*$  分别为  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{F}$  的共轭算符。

因此, 根据共轭性质推导的蜕变关系 MR1, 数学表达式为:

$$\text{MR1}(r, R): r\{\mathbf{M}_1, \mathbf{F}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{F}_2 \mid \mathbf{M}_2 = \mathbf{M}_1^T, \mathbf{F}_2 = \mathbf{F}_1^T\} \rightarrow R\{k_{\text{eff}}, k_{\text{eff}}^* \mid k_{\text{eff}}^* = k_{\text{eff}}\} \quad (4)$$

式(4)中的  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{F}$  为求解式(2)程序  $P$  的输入矩阵,  $k_{\text{eff}}$  为输出结果。根据 MR1, 若计算的  $k_{\text{eff}}$  不同, 则程序  $P$  存在缺陷。

#### 2) 蜕变关系 MR2

根据式(2)的齐次线性特点, 假设有非零常

数  $\alpha$ 、 $\beta$ , 分别乘以方程两边, 得:

$$\alpha \mathbf{M}\Phi = \beta \frac{1}{k_{\text{eff}}}\mathbf{F}\Phi \quad (5)$$

设  $\mathbf{M}' = \alpha \mathbf{M}$ ,  $\mathbf{F}' = \beta \mathbf{F}$ , 比较式(2)、(5), 可得:

$$k'_{\text{eff}} = \frac{\beta}{\alpha} k_{\text{eff}}$$

因此, 根据齐次性得到蜕变关系 MR2, 数学表示式为:

$$\text{MR2}(r, R): r\{\mathbf{M}_1, \mathbf{F}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{F}_2 \mid \mathbf{M}_2 = \alpha \mathbf{M}_1, \mathbf{F}_2 = \beta \mathbf{F}_1\} \rightarrow R\{k_{\text{eff}}, k'_{\text{eff}} \mid k'_{\text{eff}} = \frac{\beta}{\alpha} k_{\text{eff}}\} \quad (6)$$

根据 MR2, 若计算的  $k_{\text{eff}}$  不满足  $\beta/\alpha$  关系, 则程序  $P$  存在缺陷。

### 3.2 衍生基准题

1) 依据蜕变关系 MR1( $r, R$ ), 由原始基准题 SLAB\_1D\_2G(CASE1), 生成衍生基准题 CASE2, 参数列于表 2。

因为 CASE2 与 CASE1 的输入参数满足 MR1( $r, R$ ) 的输入关系  $r$ , 所以 CASE2 与 CASE1 测试计算的结果应满足 MR1( $r, R$ ) 的输出关系  $R = \{k_{\text{eff}}, k_{\text{eff}}^* \mid k_{\text{eff}}^* = k_{\text{eff}}\}$ ; 否则, 说明  $P$  出错。

显然, 由共轭性质推导的蜕变关系 MR1 衍生的基准题与原始基准题的  $k_{\text{eff}}$  相等且均  $k_{\text{eff}} < 1$ , 表明衍生基准题与原始基准题属于同一等价类。

2) 依据蜕变关系 MR2( $r, R$ ) 中的输入关系  $r$ , 由原始基准题 CASE1, 取常数  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 3$ , 则  $\mathbf{M}_2 = 2\mathbf{M}_1$ ,  $\mathbf{F}_2 = 3\mathbf{F}_1$ , 则得到衍生测试用例 CASE3, 参数列于表 3。

因为 CASE3 与 CASE1 的输入参数满足

表 2 SLAB\_1D\_2G 一维平板衍生基准题 CASE2 参数

Table 2 Parameter of SLAB\_1D\_2G one-dimensional tablet follow-up benchmark CASE2

能群	$D/\text{cm}$	$\Sigma_t/\text{cm}^{-1}$	$\nu\Sigma_f/\text{cm}^{-1}$	$\chi$	$\Sigma_{1 \rightarrow 2}/\text{cm}^{-1}$
1	1.264	$8.154 \times 10^{-3}$	1.000	0.000	$7.368 \times 10^{-3}$
2	$9.328 \times 10^{-1}$	$4.100 \times 10^{-3}$	0.000	$4.562 \times 10^{-3}$	$7.368 \times 10^{-3}$

表 3 SLAB\_1D\_2G 一维平板衍生基准题 CASE3 参数

Table 3 Parameter of SLAB\_1D\_2G one-dimensional tablet follow-up benchmark CASE3

能群	$D/\text{cm}$	$\Sigma_t/\text{cm}^{-1}$	$\nu\Sigma_f/\text{cm}^{-1}$	$\chi$	$\Sigma_{1 \rightarrow 2}/\text{cm}^{-1}$
1	2.528	$1.631 \times 10^{-2}$	0.000	3.000	$1.474 \times 10^{-2}$
2	1.866	$8.200 \times 10^{-3}$	$1.369 \times 10^{-2}$	0.000	$1.474 \times 10^{-2}$

MR2( $r, R$ )的输入关系 $r$ ,所以CASE3与CASE1测试计算的结果应满足MR2( $r, R$ )的输出关系 $R\left\{k_{\text{eff}}, k'_{\text{eff}} \mid k'_{\text{eff}} = \frac{3}{2}k_{\text{eff}}\right\}$ ;否则,说明 $P$ 出错。

显然,由齐次线性推导的蜕变关系MR2生成的衍生基准题的输出结果 $k'_{\text{eff}} > 1$ ,与原始基准题不属于同一等价类。

综上所述,对比MR1和MR2分别衍生的基准题,表明由齐次线性推导的蜕变关系MR2较共轭性质推导的蜕变关系MR1更具优势,不但生成了衍生基准题,扩充了基准题数量,且能覆盖不同的等价类,使验证测试达到了充分性准则的要求。

#### 4 小结

通过推导堆芯中子扩散程序涉及的物理模型的蜕变关系,由现有基准题,依据蜕变关系生成了更多的衍生测试基准题,是提高验证测试充分性的一种可行的技术路线。

下一步工作将从实用有效蜕变关系的发现方法、基于充分性准则的蜕变测试方法以及开发基于蜕变测试的自动化测试工具等方面展开深入研究。

#### 参考文献:

[1] 刘占权,杨超,党哈雷,等. COSINE软件包物理系统V&V策略研究[J]. 原子能科学技术, 2013,47(增刊):323-326.  
LIU Zhanquan, YANG Chao, DANG Halei, et al. Research on V&V strategy of reactor physics code of COSINE[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(Suppl.): 323-326(in Chinese).

[2] 陈义学,刘占权,胡啸宇,等. COSINE软件包堆芯物理分析程序CORE开发与初步测试验证[J]. 原子能科学技术,2013,47(增刊):365-368.  
CHEN Yixue, LIU Zhanquan, HU Xiaoyu, et al. Development and preliminary verification of core physics analysis code core of COSINE code package[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47 (Suppl.): 365-368 (in Chinese).

[3] 李硕,张斌,刘志彦,等. COSINE软件包组件参数计算程序LATC中 $S_N$ 运输模块的开发与初步验证[J]. 原子能科学技术,2013,47(增刊):338-341.  
LI Shuo, ZHANG Bin, LIU Zhiyan, et al. Development and preliminary validation of  $S_N$  transport module in lattice code LATC of COSINE package[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47 (Suppl.): 338-341 (in Chinese).

[4] CHEN T Y, CHEUNG S C, YIU S M. Metamorphic testing: A new approach for generating next test cases, technical report HKUST-CS98-01[R]. Hong Kong: University of Science and Technology, 1998.

[5] CHEN T Y, FENG J, TSE T H. Metamorphic testing of programs on partial differential equations: A case study[C]//Proceedings of the 26th International Computer Software and Applications Conference on Prolonging Software Life: Development and Redevelopment. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2002: 327-333.

[6] CHEN T Y, KUO F C, TSE T H, et al. Metamorphic testing and beyond[C]//Proceedings of the International Workshop on Software Technology and Engineering Practice (STEP 2003). [S. l.]: IEEE Computer Society, 2003: 94-100.

[7] CHEN T Y, HUANG D H, TSE T H, et al. Case studies on the selection of useful relations in metamorphic testing[C]//Proceedings of the 4th Ibero-American Symposium on Software Engineering and Knowledge Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2004: 569-583.

[8] ZHOU Z Q, HUANG D H, TSE T H, et al. Metamorphic testing and its applications[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Future Software Technology. [S. l.]: [s. n.], 2004: 346-351.

[9] 谢金森. ADS次临界反应堆物理特性的谐波展开法研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2016.

[10] SINGH K P, DEGWEEKER S B, MODAK R S, et al. Iterative method for obtaining the prompt and delayed alpha-modes of the diffusion equation [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(9): 1 996-2 004.