

# 基于复杂性测度的高温气冷堆模拟机 运行模式识别及诊断研究\*

房超<sup>1)†</sup> 孙俊<sup>1)</sup> 赖宇阳<sup>2)</sup>

1) (清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

2) (北京树优信息技术有限公司, 北京 100081)

(2012年4月6日收到; 2012年6月8日收到修改稿)

本文通过对高温气冷堆模拟机在运行过程中的 12 组状态参数进行分析, 研究了反应堆在正常运行状态、余热排出系统空气侧温度上升和一回路突然泄漏三种条件下系统的复杂度和稳健性等指标的变化. 研究表明, 在条件发生改变时, 高温气冷堆模拟机系统的复杂度有非常明显的变化, 且不同条件下, 对于系统复杂性影响显著的参数也不相同. 此外, 反应堆模拟机中各系统间耦合计算与相互反馈机理的作用, 在系统的稳健度上也有很明显的体现. 这些成果表明, 复杂性分析方法在系统状态监测和危机预警领域可以发挥重要的作用.

**关键词:** 高温气冷堆, 模拟机, 复杂度, 稳健度

**PACS:** 05.10.-a, 28.41.-i, 28.41.Ak

## 1 引言

与复杂性测度有关的非线性思想为模式辨识及诊断提供了一种新思路, 其最初定义是由 Kolmogorov 于 1965 年提出, 并经 Lempel 和 Ziv 发展成为具体的复杂度算法<sup>[1]</sup>. Marczyck 于 2006 年提出, 复杂性测度是系统结构化信息度量的定义, 并通过与模型无关的计算方法进行复杂系统信息拓扑结构的抽取<sup>[2]</sup>. 复杂性测度理论已经被应用于网络计算<sup>[3]</sup>、蛋白质折叠动力学<sup>[4]</sup>、湍流模型稳健性分析<sup>[5]</sup>、爆破学<sup>[6]</sup>和非线性系统控制<sup>[7]</sup>等, 为众多复杂现象提供了深层次的物理解释.

尽管复杂性测度理论已有较广泛的应用, 但并未应用于核电站模拟机运行模式识别. 核电站模拟机<sup>[8]</sup>主要是基于反应堆堆芯以及各个回路设备的数学、物理模型进行计算演化, 在计算机上对真实的反应堆运行过程进行仿真, 并能根据操作员的实

际动作引入计算机信号, 将反应堆的稳态运行和瞬变过程通过图形化界面实时地展示出来, 帮助操作员熟悉反应堆的操作规程, 理解反应堆运行中出现的各种现象, 熟练掌握启停堆、正常运行以及事故应急的基本技能, 尤其是在事故状态时能够合理操作使反应堆处于安全控制状态之下. 因此, 模拟机需要尽可能真实地再现反应堆的各种状态和变化过程, 应兼顾实时性、准确性、可靠性以及逼真性等主要特点.

本文将基于复杂性测度理论, 对 HTR-PM 模拟机中引入的动态测试进行分析, 并对 HTR-PM 模拟机中正常运行状态、余热排出系统空气侧温度上升和一回路突然泄漏三种情况以及整个模拟机测试阶段进行分析, 从纯粹的非线性统计学的角度研究 HTR-PM 模拟机的堆芯功率、堆芯流量以及堆芯出口温度等参数的变化, 明确对于复杂系统稳健性有重要影响的参数, 为未来基于状态导向判断反应堆运行情况诊断做出理论上的指导.

\* 国家重大科技专项经费资助项目 (批准号: ZX06901) 和国家自然科学基金 (批准号: 11104156) 资助的课题.

† E-mail: fangchao@tsinghua.edu.cn

## 2 研究方法

### 2.1 复杂性测度理论及其应用

本研究中所用的非线性分析方法主要基于的是 Marczyk 复杂性测度理论. 我们可将 HTR-PM 模拟机众多参数所构成的多元数据集形成系统结构图 [9-11], 测量所有参数之间的关联规则强度和熵 [12], 进而分析系统整体复杂度.

系统结构图源自模糊认知图的思想, 用于获取变量间的因果联系和依赖关系 [13]. 系统结构图是一个三元组  $U = (V, L, C)$ , 其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示变量集合, 称之为节点,  $L : (V_i, V_j) \rightarrow R_{ij}$  是一映射 ( $R_{ij}$  表示  $V_i$  与  $V_j$  间所有模糊规则的并集,  $V_i, V_j \in V$ ), 称为连接线;  $C : (V_i, V_j) \rightarrow (\lambda_{ij}, e_{ij})$  是一映射 ( $\lambda_{ij}$  表示  $V_i$  与  $V_j$  间广义相关系数  $\lambda_{ij} = \sqrt{1 - \exp(-2 \times I(V_i, V_j))}$ , 其中  $I(V_i, V_j)$  为互信息 [14],  $e_{ij}$  表示  $V_i$  与  $V_j$  构成的相空间图像熵  $e_{ij}$ ,  $V_i, V_j \in V$ ), 称为连接点. 根据 Zadeh 不相容原理 [15], 复杂系统的不确定性越高, 对其的精确描述越困难. 因此, 可按照一定的模糊水平数将相空间分割成有限的模糊单元, 以便有效地抽取复杂系统中变量之间的模糊依赖规则.

拓扑结构稳健性是系统结构图的一个重要属性, 它是系统结构图当前复杂度与复杂度上界和复杂度下界的函数. 在临界复杂度处, 一个微小信息熵的增加都将导致系统结构图结构的破坏; 越接近复杂度下界, 则系统行为越接近确定性系统. 通常一个系统的复杂度介于复杂度上界和下界之间, 呈现兼具随机性和确定性的行为.

此外, 还可以通过复杂度和稳健性定量指标, 将多元动态系统距离临界危险状态的程度和变化趋势揭示出来. 其中, 稳定系统的复杂度随着时间变化保持在一个稳定的水平; 较稳定系统的复杂度变化较小, 且随着时间的增长复杂度逐渐增大; 不稳定系统的复杂度变化较为剧烈, 且无明显规律性; 出现崩溃的系统复杂度会突然降低.

### 2.2 HTR-PM 模拟机的基本结构和物理模型

HTR-PM 模拟机主要具备以下功能: 1) 三维柱坐标、四群的中子时空动力学实时仿真模型; 2) 与堆芯中子动力学模型相匹配的堆芯流体网络、传

热网络模型; 3) 可满足实时求解要求的大型稀疏矩阵的快速算法; 4) 高温气冷堆特有的氦气、石墨、碳砖等介质的物性、阻力特性、传热特性数据库.

堆芯物理模型采用三维圆柱  $(r, \theta, z)$  坐标下的中子时空动力学方程 (不考虑向上散射条件), 描述为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{V_g} \frac{\partial \varphi_g(r, \theta, z, t)}{\partial t} \\ &= \nabla \cdot D_g \nabla \varphi_g(r, \theta, z, t) \\ & - \Sigma_g^R \varphi_g(r, \theta, z, t) \\ & + \sum_{g'=1}^{g-1} \Sigma_{g' \rightarrow g} \varphi_{g'}(r, \theta, z, t) \\ & + (1 - \beta) \chi_g \sum_{g'=1}^G (\nu \Sigma_f)_{g'} \varphi_{g'}(r, \theta, z, t) \\ & + \chi_g \sum_{i=1}^{Id} \lambda_i C_i(r, \theta, z, t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_i(r, \theta, z, t)}{\partial t} \\ &= \beta_i \sum_{g'=1}^G (\nu \Sigma_f)_{g'} \varphi_{g'}(r, \theta, z, t) \\ & - \lambda_i C_i(r, \theta, z, t), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 下标  $g = 1, 2, \dots, G$  是能群号, 下标  $i = 1, 2, \dots, Id$  是缓发中子先驱核的组标号,  $V_g$  是第  $g$  群的中子速率,  $\varphi_g(r, \theta, z, t)$  是  $t$  时刻第  $g$  群的中子注量率,  $C_i(r, \theta, z, t)$  是  $t$  时刻第  $i$  群缓发中子先驱核浓度,  $\beta_i, \lambda_i$  分别是缓发中子份额及其先驱核衰变常数, 且  $\beta = \sum_{i=1}^{ID} \beta_i$ ,  $\Sigma_g^R, \Sigma_{g' \rightarrow g}, (\nu \Sigma_f)_g$  是宏观截面,  $D_g$  是扩散系数,  $\chi_g$  为裂变中子能谱. 根据改进的准静态方法, 可对中子注量率进行时间和空间变量分离求解, 得到严格解.

堆芯的热工水力模型主要采用流体网络和传热网络实现. 流体网络将三维流动划分为节点和连接节点的支路, 依据支路上一维流动的动量守恒方程以及节点处的质量守恒方程, 建立节点压力和支路流量的方程组. 对于压力为  $p$  的节点, 假设有  $m$  个上游节点和  $n - m$  个下游节点, 在时间步长  $\tau$  上隐式展开的节点线性化压力方程为

$$- \left( \sum_{i=1}^m R_{b,i} + \sum_{j=1}^{n-m} R_{b,m+j} + \frac{V}{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial p} \right) p_{t+1}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{i=1}^m R_{b,i} p_{i,t+1} + \sum_{j=1}^{n-m} R_{b,m+j} p_{m+j,t+1} \\
 & = \sum_{i=1}^m C_{b,i} - \sum_{j=1}^{n-m} C_{b,m+j} - \left( \frac{V}{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_t p_t, \quad (3) \\
 & \frac{\partial C_i(r, \theta, z, t)}{\partial t} \\
 & = \beta_i \sum_{g'=1}^G (\nu \Sigma_f)_{g'} \varphi_{g'}(r, \theta, z, t) \\
 & \quad - \lambda_i C_i(r, \theta, z, t), \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中, 支路流量为  $w$ ,  $\rho$  为节点密度,  $V$  为节点容积,  $R_b$  和  $C_b$  分别为支路特性参量,  $f$  为支路摩擦阻力系数,  $A$  为支路流动截面积,  $g$  为重力加速度,  $H$  为支路高差,

$$\begin{aligned}
 R_b &= 1 / \left( \frac{f}{\rho A^2} |w| \right), \\
 C_b &= - \left( \frac{f}{2\rho A^2} |w| w + \rho g H \right) / \left( \frac{f}{\rho A^2} |w| \right).
 \end{aligned}$$

与流体网络类似, 传热网络将导热、对流和热辐射依据集总参数法进行简化, 包括传热节点和传热支路. 对于温度为  $T$  的节点, 通过  $n$  条传热支路与  $m$  个内节点和  $n - m$  个边界点相连, 时间步长  $\tau$  上隐式展开 (辐射换热用显式展开) 后的能量守恒方程为

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{C_p M}{\tau} + \sum_{i=1}^n (A_{1i} \lambda_i) \right] T_{t+1} - \sum_{i=1}^m (A_{1i} \lambda_i) T_{i,t+1} \\
 & = \frac{C_p M}{\tau} T_t + \sum_{i=1}^n \{ K_i A_{2i} [(T_{i,t} + T_0)^4 \\
 & \quad - (T_t + T_0)^4] \} \\
 & \quad + \sum_{i=1}^{n-m} (A_{1i} \lambda_i T_{i,t}) + Q_{\text{ext}}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中,  $C_p$  为节点比热容,  $M$  为节点质量,  $T_0$  为绝对温度  $273.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $A_{1i}$ ,  $A_{2i}$ ,  $\lambda_i$  和  $K_i$  分别为当前节点与第  $i$  个相连的节点或边界点之间的等效对流换热面积、等效辐射换热面积、等效对流换热系数和等效辐射换热系数,  $Q_{\text{ext}}$  为等效内热源功率.

HTR-PM 模拟机的计算是一个动态过程, 中子动力学与热工水力学采用并行计算, 依靠快速算法, 可以实现大规模实时求解, 主要流程见图 1.

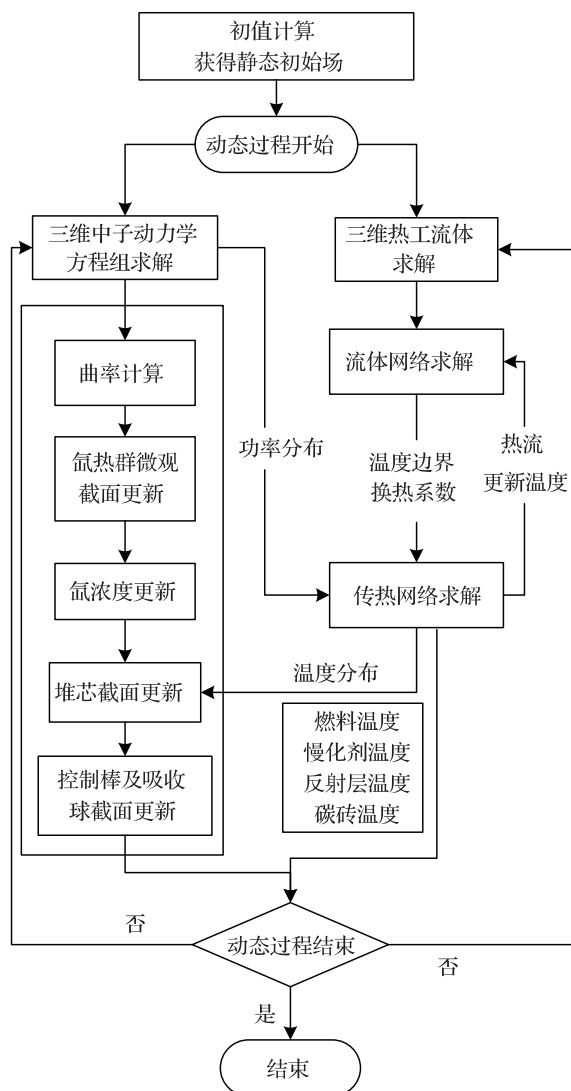


图 1 HTR-PM 模拟机计算流程图

### 3 利用复杂性测度方法诊断 HTR-PM 模拟机运行时的状态及稳健性

利用 HTR-PM 模拟机进行高温气冷堆的动态测试模拟, 并通过复杂性测度理论分析这一过程中. 模拟过程中包含 3 个典型条件: 正常运行状态、余热排出系统空气侧温度上升 (于 1134 s 发生)、一回路突然泄漏 (于 1567 s 发生), 并观察 12 个状态参数 (1# 堆功率、1# 堆氦气压力、1# 堆底反射层温度、1# 堆石墨块内侧温度、1# 堆热气导管中心壁温、1# 堆水冷壁温度、1# 堆给水泵流量、1# 堆蒸发器出口温度、1# 堆反应堆压力容器顶部温度、凝结水用户母管压力、凝汽器循环

水回水温度、1# 堆膨胀水箱温度) 以及系统整体稳健度的变化。

我们采用 OntoSpace 软件对该过程数据进行动态过程复杂性分析, 时间窗口设为 60 s, 移动步长为 1 s (每两个时间窗口重叠 59 s), 总共需要计算 2050 个时间窗口。辨识该数据中包含的系统运行模式和阶段, 分析系统复杂度、不确定性(熵)、稳健性变化规律, 分析运行各阶段对系统健康度影响较大的关键参数。

系统复杂度、临界复杂度、总熵和稳健度变化过程如图 2 所示, 在 A 时刻 (1134 s) 对应余热排出系统空气侧温度上升的操作, 在 B 时刻 (1567 s) 对应一回路突然泄漏的操作。

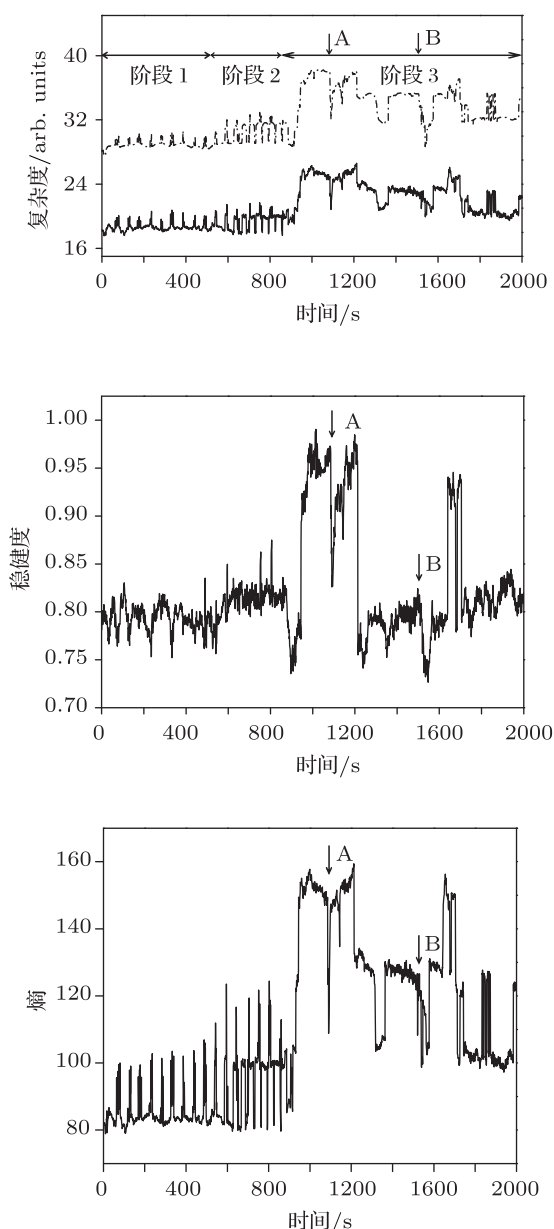


图 2 复杂度、临界复杂度(虚线)、稳健度、总熵变化

根据系统复杂度和总熵的波动情况, 可以看到存在三个明显不同的阶段, 其相应的数据统计值如图 3 所示。

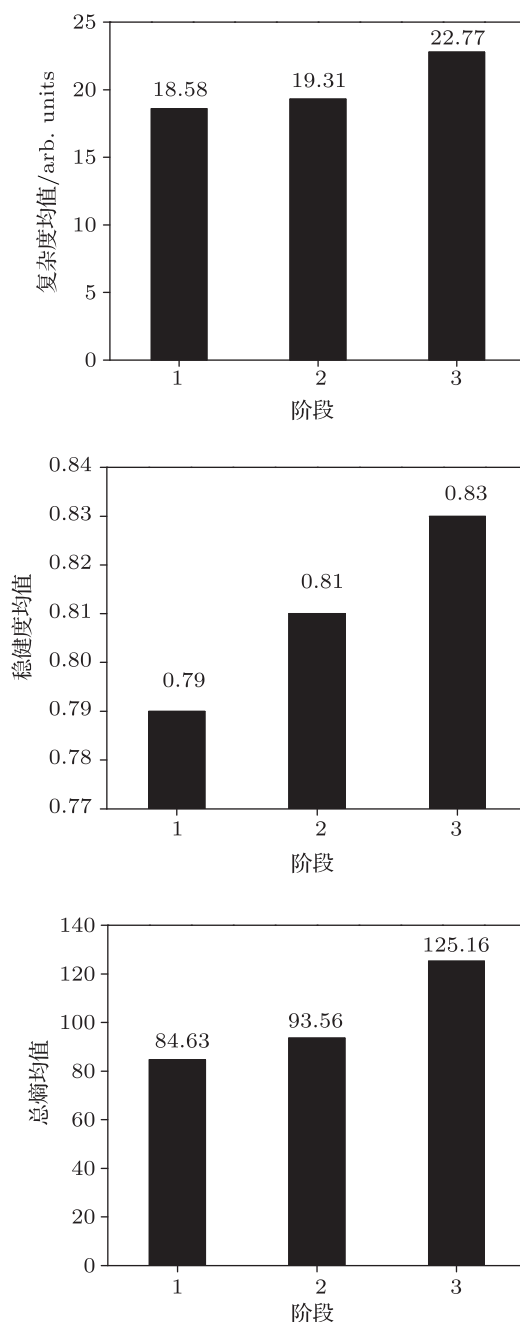


图 3 三个阶段复杂度、稳健度和总熵统计指标

三个阶段的复杂度、总熵和稳健度的均值和方差系数呈上升趋势, 其中第三个阶段上升程度最为剧烈, 同时波动也最剧烈。下面分别讨论三个阶段的复杂性特征。

图 4 显示了阶段 1 系统各指标的变化情况。图中可以明显观察到周期约为 50—60 s 的周期性波峰, 在波峰处总熵上升、复杂度上升, 稳健度未发

生明显变化,说明系统存在能量的输入,这是系统内部各系统耦合计算与相互反馈机理的作用.阶段1内系统结构稳定,各项指标波动较小,复杂度平均值为18.58,总熵均值为84.63,稳健度均值为79%,稳健度在75%到83%区间波动,说明系统在阶段1中的稳健度较好.

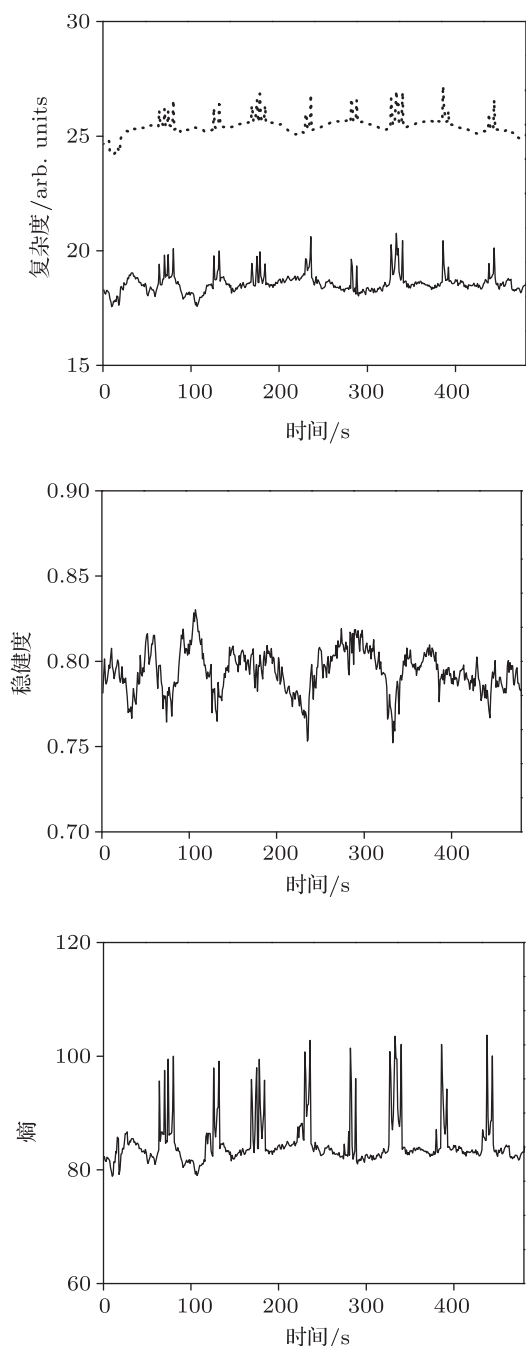


图4 阶段1的复杂度、临界复杂度(虚线)、稳健度和总熵的变化

波峰的频率快速减小,从50s缩短到30s左右,每个周期伴随总熵和复杂度高位持续时间约为20s.阶段2内系统各指标波动逐步增大,复杂度平均值为19.31,总熵均值为93.56,由于与临界复杂度之间的距离增大,其稳健度均值为81%,稳健度在76%到88%区间波动.

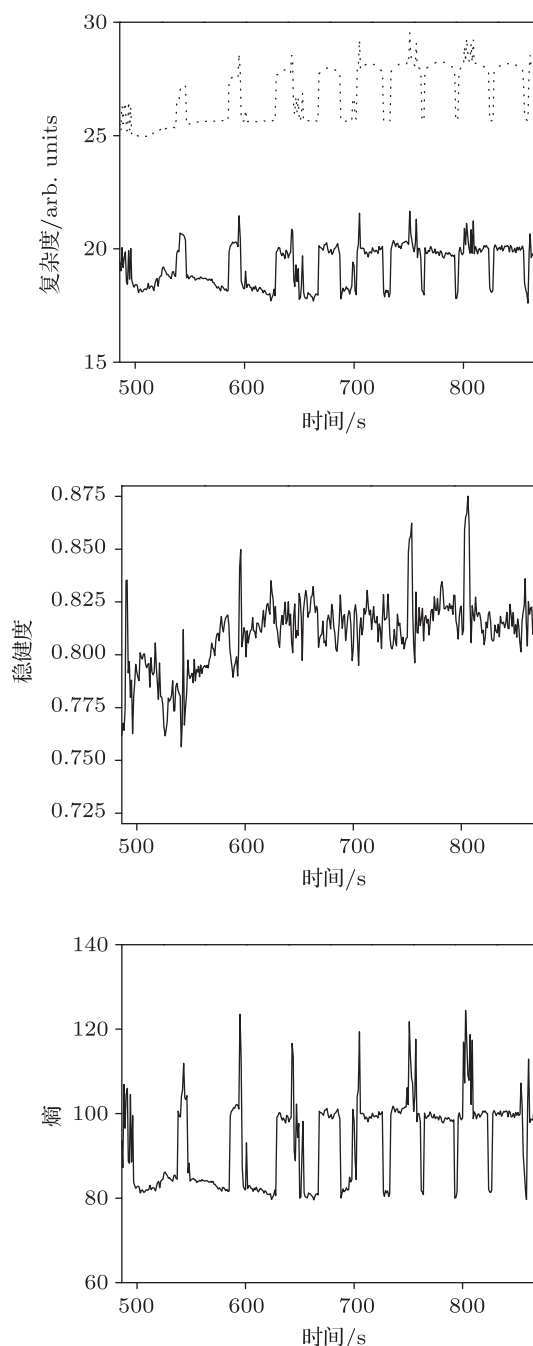


图5 阶段2的复杂度、临界复杂度(虚线)、稳健度和总熵的变化

图5显示了阶段2系统各指标的变化情况.图中可以明显观察到系统经历了复杂性和总熵的逐步升高过程.同时,系统出现总熵和复杂度周期性

图6显示了阶段3系统各指标的变化情况.与阶段1和2不同,阶段3中系统周期性消失,代之以复杂的强非线性动力学过程和系统结构剧烈变化,

其复杂度均值达到 22.77, 方差系数达 8.41%; 总熵均值 125.16, 方差系数 15.49%; 稳健度均值 83%, 方差系数 8.18%, 波动区间为 73%到 99%, 在短时间内经历了稳健度之间的剧烈波动. 在进入阶段 3 的初期, 可以明显观察到系统复杂性、总熵和稳健度突然下降, 然后快速升高并伴随剧烈波动的过程. 系统在 957 s 处达到稳健度最低值 73%, 经历了 50 s 后系统的稳健度快速回升并跳升至 92%高位.

表 1 对应图 6 中 A 时刻余热排出系统空气侧温度上升的操作, 这导致在 7 时间内, 系统稳健度从 97%急剧下降为 84%, 降幅达 13%. 系统稳健度急剧降低的原因在于临界复杂度降幅 (-16%) 超过了当前系统复杂度的降幅 (-15%), 导致系统逼近临界不安全状态. 由于余热排出系统的变化, 系统总熵大幅下降 24%, 系统整体不确定性下降. 随后由于各系统间耦合计算与相互反馈作用, 系统的稳健度、总熵和复杂度再次恢复到余热排出系统变化之前的状态.

表 2 对应图 6 中 B 时刻一回路突然泄漏时的指标变化情况, 该操作导致在 32 s 时间内, 系统稳健度从 81%急剧下降为 75%, 降幅达 7%. 系统稳健度急剧降低的原因在于临界复杂度降幅 (-21%) 超过了当前系统复杂度的降幅 (-13%), 导致系统逼近临界不安全状态. 与余热排出系统空气侧温度上升相同, 由于模拟机模型中各个系统间的耦合计算与相互反馈机理, 随后系统稳健度、总熵和复杂度各项指标缓慢恢复到一回路突然泄漏之前的状态.

此外, 我们还分析了模拟机运行的三个阶段中不同参数对于系统稳健度的贡献, 表 3 将各状态参数在每个阶段中对系统健康度的贡献率进行排序. 其中, 凝汽器循环水回水温度是三个阶段中都需要重点监测的关键参数. 除此之外, 1# 堆功率和 1# 堆水冷壁温度同时出现在阶段 1 和阶段 2 的关键参数中; 而 1# 堆反应堆压力容器顶部温度同时出

现在阶段 2 和阶段 3 的重点参数中.

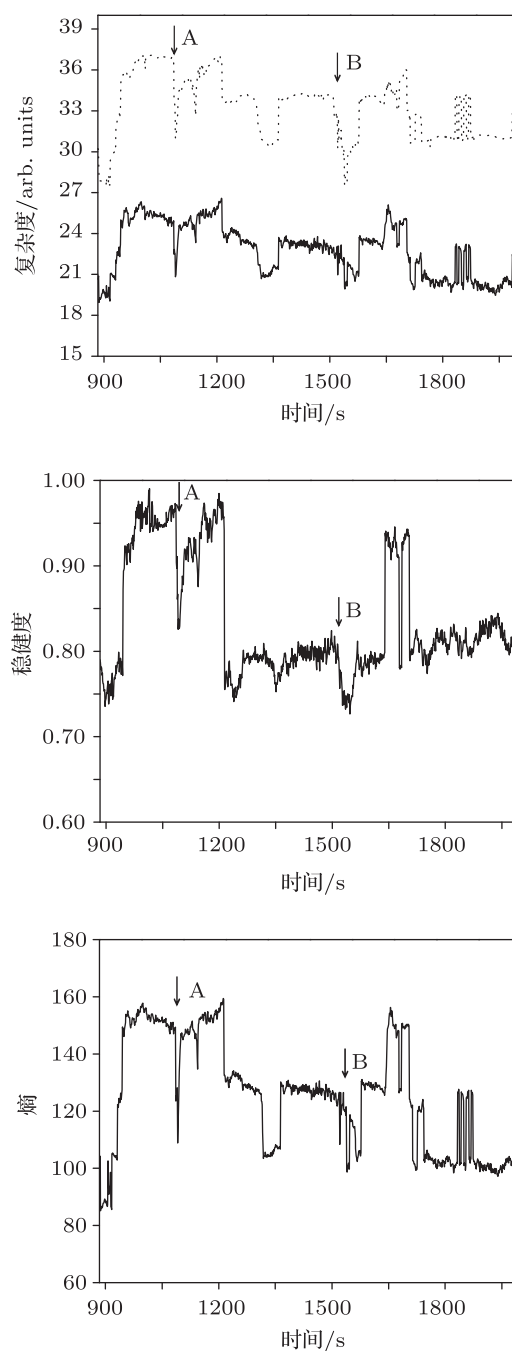


图 6 阶段 3 的复杂度、临界复杂度 (虚线)、稳健度和总熵的变化

表 1 余热排出系统空气侧温度上升时各指标变化

起止时间窗口/s	起止时间/s	复杂度	临界复杂度	总熵	稳健度/%
1085	1143	24.92	34.56	149.39	97
1092	1150	21.12	28.89	114.16	84
下降百分比/%		-15	-16	-24	-13

表2 一回路突然泄漏时各指标变化情况

起止时间窗口/s	起止时间/s	复杂度	临界复杂度	总熵	稳健度/%
1508	1567	22.78	31.78	125.17	81
1540	1599	19.93	25.26	98.70	75
下降百分比/%		-13	-21	-21	-7

表3 各状态参数对三个阶段系统健康度的贡献率排序

参数	对系统健康度的贡献率/%			参数	对系统健康度的贡献率/%		
	阶段1	阶段2	阶段3		阶段1	阶段2	阶段3
1# 堆功率	12.59	10.67	9.36	1# 堆给水泵流量	12.37	9.94	9.66
1# 堆氦气压力	12.07	10.26	9.51	1# 堆蒸发器出口温度	12.54	10.12	9.59
1# 堆底反射层温度	12.76	9.88	9.30	1# 堆反应堆压力容器顶温度	12.21	10.46	9.59
1# 堆石墨块内侧温度	0.00	8.56	7.72	凝结水用户母管压力	0.00	0.00	8.46
1# 堆热气导管中心壁温	0.00	8.58	7.76	凝汽器循环水回水温度	12.75	10.29	9.54
1# 堆水冷壁温度	12.96	10.84	9.32	1# 堆膨胀水箱温度	12.24	10.45	9.33

## 4 结论

本文讨论了基于复杂性测度的反应堆模拟机状态辨识和健康度诊断的方法的实际应用. 研究表明, 本方法能够从复杂、不确定、强关联的数据中

量化的测量系统复杂度的变化, 通过稳健性指标诊断系统的健康程度, 并辨识与系统健康度关系最密切的状态参数. 这些工作表明, 复杂性方法在高温气冷堆系统状态监测和危机预警领域具有较好的应用前景.

- [1] Lempel A, Ziv J 1976 *IEEE Trans. Inform. Theory* **22** 75
- [2] Marczyk J, Deshpande B 2006 *International Conference on Complex Systems* Boston, USA, June 25–30, 2006
- [3] Barabasi A L, Albert R 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [4] Jeong H, Mason S P, Barabasi A L, Oltvai Z N 2001 *Nature* **6833** 41
- [5] Sornette D 2000 *Critical phenomena in natural sciences: chaos, fractals, selforganization and disorder* (New York: Springer) p178
- [6] Seccatore J, Tomi D G, Dompieri M, Rezende A 2011 *Braz. J. Min. & Met.* **64** 525
- [7] Aguirre C, Torres L 2000 *Inter. J. Bif. & Chaos* **10** 667
- [8] NB/T20015-2010 (中华人民共和国能源行业标准, 国家能源局, 2010)
- [9] Dong L Y, Zhou Z W 2011 *J. Shenyang Inst. Eng.* **7** 16
- [10] Stylios C D, Groumpos P P 2010 *Int. J. Intell. Syst.* **18** 83
- [11] Mantegna R N, Stanley H E 2000 *An introduction to econophysics: correlations and complexity in finance* (New York: Cambridge University) p245
- [12] Shannon C E 1948 *Bell. Syst. Tech.* **27** 379
- [13] Zadeh L A 1979 *Fuzzy sets and information granularity* (Amsterdam: North-Holland) p3
- [14] Dezso Z, Barabasi A L 2002 *Phys. Rev. E* **65** 055103
- [15] Celluci C J, Albano A M, Rapp P E 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066208

# Complexity-based pattern recognition and diagnosis for engineering simulation system of HTR-PM\*

Fang Chao<sup>1)†</sup> Sun Jun<sup>1)</sup> Lai Yu-Yang<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*SOYOTEC Technologies Co., Ltd, Beijing 100081, China*)

(Received 30 March 2012; revised manuscript received 8 June 2012)

## Abstract

Complexity-based pattern recognition and diagnosis for engineering simulation system of HTR-PM are carried through analyzing 12 state parameters of the nuclear reactor. It is shown that the complexities and robustnesses of HTR-PM simulation system are remarkably discrepant in three different operating modes (normal operation, increased ambient temperature and sudden leakage in primary loop). The effectivenesses of coupling calculations and feedback of multi systems of the HTR-PM simulator are also embodied in system robustness. All these results demonstrate that the method of complexity and robustness can indicate the availability of different parameters for recognizing and diagnosing the operating conditions of the HTR-PM.

**Keywords:** HTR-PM, simulator, complexity, robustness

**PACS:** 05.10.-a, 28.41.-i, 28.41.Ak

---

\* Project supported by the National Science and Technology Major Project (Grant No. ZX06901), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11104156).

† E-mail: fangchao@tsinghua.edu.cn