

近代核反应堆物理分析与计算方法
大作业

3119103291 黄义涵

3119103290 郭 林

3119103322 郝 喆

1. 作业要求:

使用 Carlvik's 两项有理近似的等价理论, 计算下列组件 U-238 的有效截面。

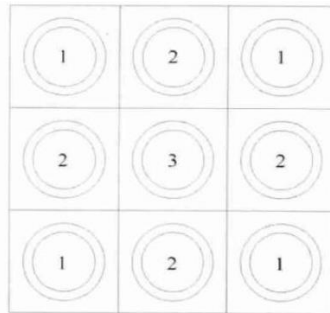


图 1 3×3 组件示意图

具体要求:

1. 使用典型压水堆栅元和组件的尺寸
2. 燃料中含有 U-238 和 H-1
3. 栅元 1 和栅元 2 材料和几何相同
4. 栅元 3 为水洞
5. 所有温度均为 300K

2. 计算过程

2.1 问题建模

2.1.1 几何尺寸:

燃料棒半径: 0.4075cm

气隙半径: 无气隙

包壳半径: 无包壳

两棒中心间距: 1.27cm

2.1.2 材料确定:

燃料棒材料: U-238 原子核密度: $2.180\text{E-}2/(b*\text{cm})$

H-1 原子核密度: $4.360\text{E-}2/(b*\text{cm})$

慢化剂材料: O-16 原子核密度: $3.350\text{E-}02/(b*\text{cm})$

H-1 原子核密度: $6.700\text{E-}2/(b*\text{cm})$

2.1.3 温度确定:

由于 WIMS 数据库中核素温度存在 293K, 600K, 900K, 1100K 等值, 考虑 300K 和 293K 相差不大, 因此本作业中将所有材料温度改为 293K

2.2 丹可夫因子的计算

由于二维几何使用碰撞概率法计算丹可夫因子过于复杂, 因此使用中子

流方法计算丹可夫因子。基于 NECP-X，根据 2.1 的建模，可以计算得到栅元 1 和栅元 2 的丹可夫因子。其计算结果如下：

表 1 栅元号与丹可夫因子对应关系

栅元号	丹可夫因子 C
1	0.271990544
2	0.235123642

2.3 计算过程

1. 基于 Carlvik's 两项有理近似公式，2.2 计算得到的 1 号栅元丹可夫因子 C ，计算得到：

$$A = \frac{1-C}{C}$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{(5A+6) \mp \sqrt{A^2 + 36A + 36}}{2(A+1)}$$

$$\beta_1 = \frac{\frac{4A+6}{A+1} - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

$$\beta_2 = 1 - \beta_1$$

2. 逃脱截面 Σe 由公式 $\Sigma e = \frac{1}{\bar{l}}$ 计算得到，其中 \bar{l} 为平均燃料棒弦长

$$\bar{l} = 4 \frac{\pi r^2}{2\pi r} = 2r。$$

3. $\sigma_{p,0}$ 为 H-1 核素的散射截面，由 WIMS 数据库中读取。
4. 基于已知的 Σe ， $\Sigma_{p,0}$ ， $\alpha_{1,2}$ ，以及 U-238 的原子核密度 N_r ，H-1 的原子核密度 N_0 ，可以计算背景截面 σ_{01} ， σ_{02} ，公式如下：

$$\sigma_{01} = \frac{\sigma_{p,0}N_0 + \alpha_1\Sigma e}{N_r}$$

$$\sigma_{02} = \frac{\sigma_{p,0}N_0 + \alpha_2\Sigma e}{N_r}$$

5. 根据计算得到的 σ_{01} ， σ_{02} ，在 U-238 共振积分表中进行插值，可以得到 U-238 吸收截面的有效共振积分 I_1, I_2 。
6. 在 WIMS 数据库中读取 U-238 的散射截面 $\sigma_{p,r}$ 。
7. 根据计算得到的 $I_1, I_2, \beta_1, \beta_2, \sigma_{p,r}$ ，计算得到 U-238 的有效吸收截面：

$$\sigma_{g,a} = \frac{\beta_1 I_1 + \beta_2 I_2}{1 - \left(\frac{\beta_1 I_1}{\sigma_{p,r} + \sigma_{01}} + \frac{\beta_2 I_2}{\sigma_{p,r} + \sigma_{02}} \right)}$$

8. 重复上述过程 3-7，直至所有共振能群有效吸收截面计算完成。
9. 重复上述过程 1-8，计算 2 号栅元共振能群的有效吸收截面。

2.4 程序实现

基于 2.3 所述计算流程，在使用 NECP-X 计算得到丹可夫因子的基础上，开发了使用 Carlvik's 两项有理近似的等价理论计算有效吸收截面的程序。程序实现过程如下：

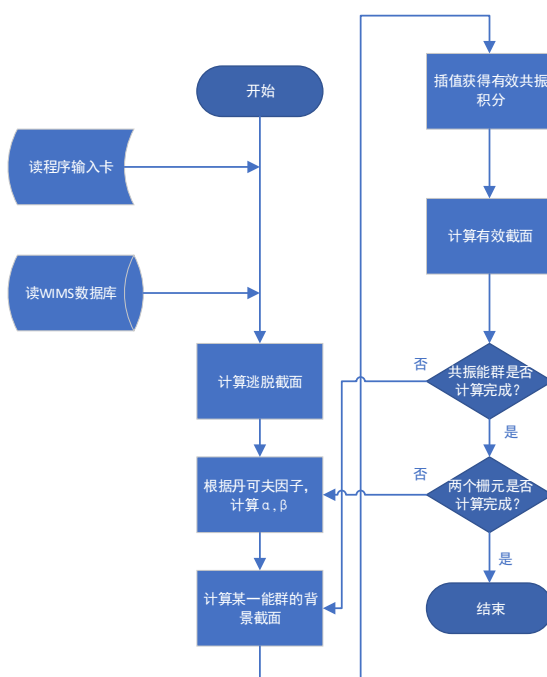


图 2 程序计算流程图

3 计算结果及分析

3.1 计算结果

基于使用 2.4 所介绍的程序，计算得到 1 号栅元和 2 号栅元的 U-238 有效吸收截面，并同 NECP-X 使用子群方法计算结果进行了比较。结果如下：

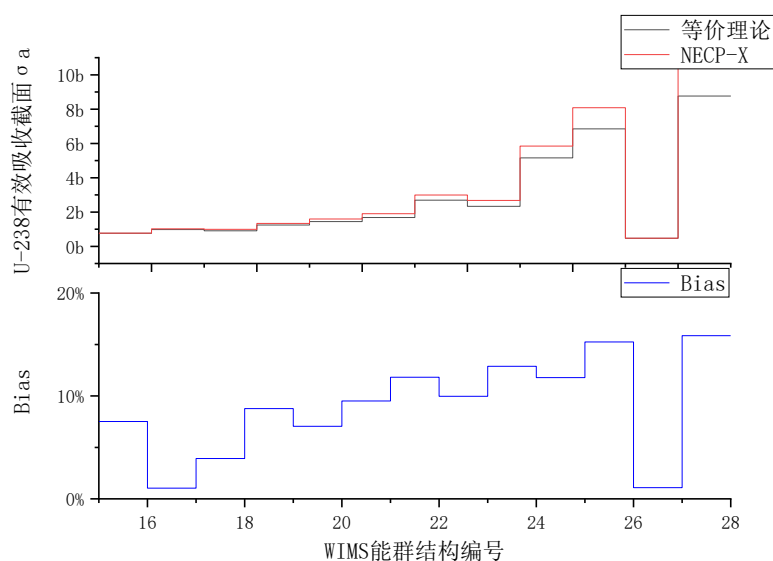


图 3 1 号栅元的 U-238 有效吸收截面

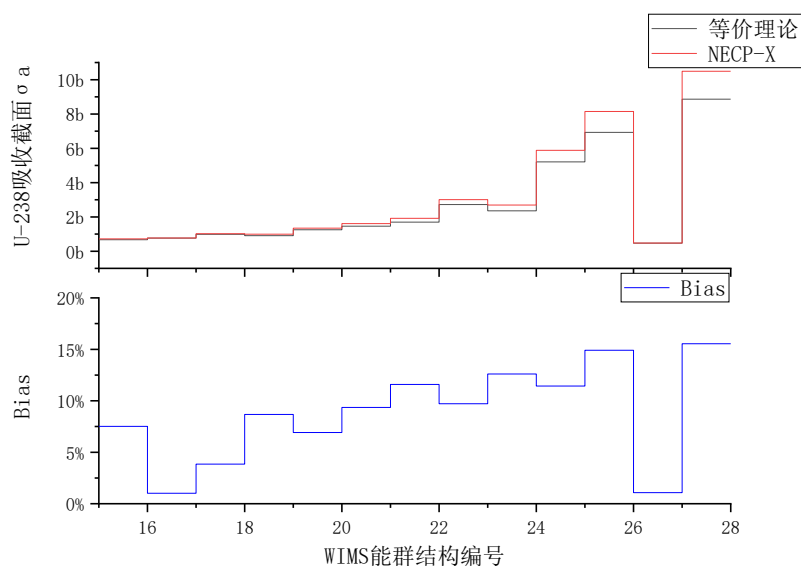


图 4 2 号栅元的 U-238 有效吸收截面

3.2 结果分析

从图 1 和图 2 可以看出，等价理论计算结果与 NECP-X 子群方法计算结果有 10%左右的偏差，最大偏差为 15%。进一步分析原因，主要是因为等价理论使用了许多近似处理，其计算精度不如子群方法；在插值获得有效共振积分的时候，使用的插值方式是简单线性插值，其插值精度也不够高。另外本题燃料棒中只含有 U-238 和 H-1，与正常的燃料棒含有 U-238 和 O-16 不同。

经测试，使用相同的方法计算，若燃料棒中只含有 U-238 和 O16，则两种方法计算得到的 U-238 平均有效吸收截面最大偏差为 5%。

4 结论

本作业使用 Carlvik's 两项有理近似的等价理论，基于 NECP-X 中使用的中子流方法计算得到了 3×3 组件的不同栅元的丹可夫因子，开发程序进一步计算得到了不同栅元 U-238 的有效吸收截面。其结果与 NECP-X 偏差在 10% 左右，主要原因是等价理论自身的近似处理，以及插值方法精度不高造成的。

参考文献：

- [1]张正习. 传统共振计算方法的改进及燃料空间自屏效应的研究[D].上海交通大学,2011.
[2]祖铁军,张乾,吴宏春,曹良志.基于广义等价理论的高保真共振计算方法[J].强激光与粒子束,2017,29(06):121-126.
[3]张乾,吴宏春,曹良志,郑友琦.等价理论的偏差分析与改进研究[J].原子能科学技术,2013,47(S2):683-688.

附：

程序使用说明：

计算程序基于 Fortran 语言编写，可以直接使用相关编译器直接编译所有相关 f90 文件。

输入卡名称为 input，其本作业使用的输入卡如下：

```
Lib:u238_res_xs_data.lib
Radius:0.4075
Temperature:293.0
Dancoff:0.1827499 0.1595748
Density_U8: 2.180E-2
Density_H1: 4.360E-2
```

图 5 程序输入卡示例

其中：

Lib: 数据库文件名称

Radius: 燃料棒半径(cm)

Temperature: 燃料棒温度(K)

Dancoff: 两个栅元的丹可夫因子,由 NECP-X 计算得到并手动填入

Density_U8: U-238 的原子核密度(/(b*cm))

Density_H1: H-1 的原子核密度(/(b*cm))

所有“:”之前的字符串均为控制字，不可更改，“:”之后的数字均为可修改的参数值。

计算得到的 U-238 有效吸收截面直接在屏幕上可见，如下图所示：

```

NECP-黄义涵@DESKTOP-8BQ56CP MINGW64 /e/Physicalhomework
$ ./test.exe
pin=
  1
Group High Boundary Low Boundary Xs_absorb
15 9.1180E+03 5.5300E+03 6.616369E-01
16 5.5300E+03 3.5200E+03 7.511350E-01
17 3.5200E+03 2.2394E+03 9.569023E-01
18 2.2394E+03 1.4251E+03 8.697466E-01
19 1.4251E+03 9.0690E+02 1.190506E+00
20 9.0690E+02 3.6726E+02 1.365740E+00
21 3.6726E+02 1.4900E+02 1.568951E+00
22 1.4900E+02 7.5501E+01 2.514755E+00
23 7.5501E+01 4.8052E+01 2.160137E+00
24 4.8052E+01 2.7700E+01 4.782815E+00
25 2.7700E+01 1.5968E+01 6.279811E+00
26 1.5968E+01 9.8800E+00 4.687237E-01
27 9.8800E+00 4.0000E+00 8.008943E+00
pin=
  2
Group High Boundary Low Boundary Xs_absorb
15 9.1180E+03 5.5300E+03 6.626231E-01
16 5.5300E+03 3.5200E+03 7.529672E-01
17 3.5200E+03 2.2394E+03 9.607970E-01
18 2.2394E+03 1.4251E+03 8.752160E-01
19 1.4251E+03 9.0690E+02 1.198954E+00
20 9.0690E+02 3.6726E+02 1.378167E+00
21 3.6726E+02 1.4900E+02 1.586568E+00
22 1.4900E+02 7.5501E+01 2.543242E+00
23 7.5501E+01 4.8052E+01 2.187529E+00
24 4.8052E+01 2.7700E+01 4.842956E+00
25 2.7700E+01 1.5968E+01 6.371750E+00
26 1.5968E+01 9.8800E+00 4.688431E-01
27 9.8800E+00 4.0000E+00 8.129854E+00

```

图 6 计算程序输出界面