反应堆物理考研试题及参考解答

吴玄 & 赵意扬

目录

更新日志

2024.5.25：更新 2011 年试题计算题第 1 题第（1）问、第（3）问的解答；更新 2014 年试题选择题第 2 题 D 选项解答；更新 2015 年试题计算题第 1 题第（3）问的解答。

2024.5.27：更新 2014 年试题选择题第 3 题 B 选项解答; 更新 2011 年试题计算题第 1 题第（4）问解答；更新 2011 年试题名词解释第 6 题解答；更新 2011 年试题论述题第 1 题解答；更新 2013 年试题名词解释第 2 题解答；更新 2013 年试题计算题第 1 题第（2）问解答；更新 2015 年试题名词解释第 3 题解答；

前言

本文档收集并重制了中国科学技术大学 2011 至 2015 年反应堆物理的考研试题, 并附以个人的试题解答。试题解答由吴玄提供初稿，赵意扬提供部分试题解答和校对。参考资料主要包括：

（1）《核反应堆物理分析》（修订本） 谢仲生等 西安交通大学出版社 原子能出版社；

如未特殊说明，则解答中提到的教材通指《核反应堆物理分析》。

如果发现试题解答有误，欢迎通过下方的邮箱联系文档作者，我们将尽快回复邮件并修改可能存在的错误。我们也欢迎读者自行向文档中添加有价值的内容并传播。

希望该文档能对复习反应堆物理这一科目的同学有所帮助。

吴玄: xuanw@mail.ustc.edu.cn

赵意扬:zyy2021@mail.ustc.edu.cn

2011 年硕士学位研究生入学考试试题（反应堆物理）

一、名词解释

1、停堆深度

答：停堆深度指全部控制毒物投入堆芯时，反应堆达到的负反应性。

2、堆芯寿期

答：堆芯寿期指一个新装料堆芯从开始运行到有效增殖因数降为 1 时，反应堆满功率运行的时间。

3、核反应率

答：核反应率指每秒每单位体积内中子和介质原子核发生作用的总次数。

4、燃耗深度

答：燃耗深度是装入堆芯的单位重量的核燃料产生的总能量的一种度量。

5、功率非均匀系数

答：教材中提到了“热中子通量密度分布分布不均匀系数”和“功率峰因子”的概念，它们的定义是芯部热中子通量密度的最大值与平均值之比，即：

$$K_H = \frac{\phi_{max}}{\frac{1}{V}\int \phi(\overrightarrow{r})dV}$$

考虑到一般可认为堆芯内中子裂变反应截面大致相等，因此通量密度也正比于裂变反应的核反应率（$R_f = \phi\Sigma_f$），故可以认为上式就是“功率非均匀系数”。

如果要更严格地考虑反应截面的分布，将表达式中的通量密度换为裂变反应的核反应率即可。

6、反应堆周期

答：考虑中子密度 $n(t) \sim e^{\omega t}$, 则称中子密度变化 e 倍（可能是增大至 e 倍或减小至 $\frac{1}{e}$）所需的时间为反应堆周期，即 $T = \frac{1}{\omega}$。更一般地，我们可以定义反应堆周期为 $T = \frac{n(t)}{\frac{dn(t)}{dt}}$。

二、计算题

1、假定只有一个中子能群（单群近似），定义符号如下：

σ_a	微观吸收截面	Σ_a	宏观吸收截面
σ_s	微观散射截面	Σ_s	宏观散射截面
σ_f	微观裂变截面	Σ_f	宏观裂变截面
ϕ	堆芯平均中子通量密度	k_{eff}	有效增殖系数
L	扩散长度	ρ	反应性
V	堆芯体积	$n(t)$	t 时刻中子数密度
Λ	平均中子每代时间	l	平均中子寿命

试计算：

1）单个中子与单个靶核发生散射反应的平均次数？

答：首先考虑单个中子和单个靶核发生散射反应的反应率，$\frac{\Sigma_s \phi V}{NV \times n(t)V} = \frac{\sigma_s \phi}{n(t)V}$。然后乘以中子的平均寿命即可得到平均反应次数：$\frac{\sigma_s \phi l}{n(t)V}$。

2）中子在被吸收之前走过距离的平均值？

答：被吸收之前走过距离的平均值为 $\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$。

3）单位时间、单位体积内的中子与单个原子核发生吸收反应的次数？

答：$\frac{\Sigma_a \phi V}{V \times NV} = \frac{\sigma_a \phi}{V}$。

4）从时间 t 到 $t+\Lambda$，堆芯内部中子数密度增加 dn, 则 k_{eff} 为？$\frac{dn}{n(t)+dn}$ 为？

答：$\Lambda = \frac{l}{k_{eff}}$ 这段时间内，中子数密度减少了 $n(t) \times \frac{l/k_{eff}}{l} = \frac{n(t)}{k_{eff}}$, 增加了 $\frac{n(t)}{k_{eff}} \times k_{eff} = n(t)$，因此 $dn = n(t)(1 - \frac{1}{k_{eff}})$,$k_{eff} = \frac{n(t)}{n(t)-dn}$，$\frac{dn}{n(t)+dn}$ 为 $\frac{k_{eff}-1}{2k_{eff}-1}$。

5）一个中子在燃料中穿行单位距离引起燃料核裂变的次数为？

答：一个中子平均穿行 λ_f 距离发生一次裂变反应，因此穿行单位距离引起的核裂变次数为 $1/\lambda_f = \Sigma_f$。

6）堆芯内单位时间内发生的裂变反应次数为？

答：$\Sigma_f \phi V$。

2、一核电站压水堆的热功率为 1000MW, 电站年负荷因子为 0.85，试估算该电站 1 年（365 天）所消耗的 ^{235}U 量。

答：电站每秒产热 10^9J，一个 ^{235}U 核可产热 200MeV，因此每秒消耗的 ^{235}U 质量为：

$$\frac{10^9\mathrm{J}}{200\mathrm{MeV} \times N_A} \times 0.235\mathrm{Kg/mol} \times (1+\alpha) = 1.43 \times 10^{-5}\mathrm{Kg}$$

这里需要乘 $1+\alpha$ 是因为有部分铀核吸收了中子但不发生裂变，α 为俘获-裂变比。

年负荷因子表示一年正常工作时间占总时间的比例，因此一年消耗的 ^{235}U 质量为：

$$1.43 \times 10^{-5} \times 365\mathrm{d} \times 0.85 = 382.30\mathrm{Kg}$$

3、设有一轻水裸圆柱形堆芯，其核参数为 L^2=4.7cm^2,τ=48cm^2, λ_{tr}=9.7cm, 加硼后 k_∞=1.072。根据修正单群理论：

1）设芯部高度 H=3.55m, 试求堆芯的临界半径；

答：

$$B_m^2 = \frac{k_\infty - 1}{M^2} = \frac{k_\infty - 1}{L^2 + \tau} = 13.66\mathrm{m}^{-2}$$

对于圆柱形堆芯，在临界状态下有：

$$B_m^2 = (\frac{\pi}{H'})^2 + (\frac{2.405}{R'})^2$$

其中 H', R' 均包含外推距离 $d = 0.7104\lambda_{tr} = 0.0689\mathrm{m}$。因此上式写为：

$$13.66 = (\frac{\pi}{H+2d})^2 + (\frac{2.405}{R+d})^2$$
$$\Rightarrow R = 0.60\mathrm{m}$$

2）如果给定堆芯半径 R=1.56m，试求堆芯的反应性。

答：给定半径和高度，则几何曲率已知：

$$B_g^2 = (\frac{\pi}{H+2d})^2 + (\frac{2.405}{R+d})^2 = 2.9\mathrm{m}^{-2}$$

$$\Rightarrow k_{eff} = \frac{k_\infty}{1 + (L^2+\tau)B_g^2} = 1.056$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} = 0.053$$

三、论述题

1、回答什么是“四因子模型”，并解释之。

答：“四因子模型”指利用公式 $k_\infty = \epsilon p f \eta$ 对热中子反应堆内中子平衡进行分析的方法。几个参数解释如下：

- k_∞: 无限介质增殖因数
- ϵ: 快中子增殖因数，即一个初始裂变中子产生的、慢化到 ^{238}U 裂变阈能以下的平均中子数
- p: 逃脱共振俘获概率，即慢化过程中逃脱共振俘获的中子的份额
- f: 热中子利用系数，即燃料吸收的热中子与所有被吸收热中子（包括被燃料吸收的、被慢化剂吸收的、被冷却剂吸收的，等等）之比
- η: 有效裂变中子数，即燃料每吸收一个热中子产生的平均裂变中子数

2、当反应堆的功率增加时，碘和氙的平衡浓度之间的关系如何变化？

答：碘的浓度上升，氙的浓度先下降后后上升。二者的平衡浓度之比为：

$$\frac{N_I(\infty)}{N_{Xe}(\infty)} = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi / \lambda_I}{\gamma \Sigma_f \phi / (\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \phi)}$$

反应堆功率增加时，ϕ 增加，因此上式增加。

3、写出点堆模型动态方程，并解释每一项的物理意义。

答：点堆模型动态方程包括以下两项：

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t)-\beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t), i = 1, 2, ..., 6 \end{cases}$$

各项的物理意义如下：

- $\frac{dn(t)}{dt}$: 中子数密度随时间变化的导数
- $\frac{\rho(t)-\beta}{\Lambda} n(t)$：所有中子的产生率减去产生先驱核的中子的消耗率，即瞬发中子的产生率。
- $\lambda_i C_i(t)$：第 i 组缓发中子的产生率
- $\frac{dC_i(t)}{dt}$：第 i 组缓发中子先驱核的浓度随时间变化的导数
- $\frac{\beta_i}{\Lambda} n(t)$：第 i 组缓发中子先驱核的产生率。

2012 年硕士学位研究生入学考试试题（反应堆物理）

一、名词解释

1、不泄露概率

答：不泄露概率指中子吸收率与中子消耗率（中子吸收率与中子泄露率之和）之比。

2、共振现象

答：共振现象指中子能量处于某些特定值时，中子与靶核形成的复合核的激发态能量接近某个量子能级，从而使吸收概率显著增加的现象。

3、换料周期

答：换料周期指两次停堆换料之间的时间间隔。

4、转换比

答：转换比指反应堆中易裂变核的生成率与消耗率之比，它也等于可转换物质的辐射俘获率与易裂变物质的吸收率之比。

5、功率非均匀系数

答：教材中提到了“热中子通量密度分布分布不均匀系数”和“功率峰因子”的概念，它们的定义是芯部热中子通量密度的最大值与平均值之比，即：

$$K_H = \frac{\phi_{max}}{\frac{1}{V}\int \phi(\overrightarrow{r})dV}$$

考虑到一般可认为堆芯内中子裂变反应截面大致相等，因此通量密度也正比于裂变反应的核反应率（$R_f = \phi\Sigma_f$），故可以认为上式就是“功率非均匀系数”。

如果要更严格地考虑反应截面的分布，将表达式中的通量密度换为裂变反应的核反应率即可。

6、反应堆周期

答：考虑中子密度 $n(t) \sim e^{\omega t}$, 则称中子密度变化 e 倍（可能是增大至 e 倍或减小至 $\frac{1}{e}$）所需

的时间为反应堆周期，即 $T=\frac{1}{\omega}$。更一般地，我们可以定义反应堆周期为 $T=\frac{n(t)}{\frac{dn(t)}{dt}}$。

二、计算题

1、反应堆的电功率为 1000MW，电站的效率为 32%,^{235}U 核每次裂变释放出的可利用能量为 200MeV。试问每秒有多少个 ^{235}U 核发生裂变？运行一年共需要消耗多少千克 ^{235}U？一座相同功率的火电厂在相同时间内需要多少千克标准煤？已知标准煤的热值为 Q=29MJ/Kg。

答：每秒释放的裂变能为 $1000\mathrm{MJ}/0.32=3.125\times10^9\mathrm{J}$, 因此每秒发生裂变的 ^{235}U 核数量为：

$$\frac{3.125\times10^9\mathrm{J}}{200\mathrm{MeV}}=9.77\times10^{19}$$

一年需要消耗的 ^{235}U 质量为：

$$\frac{9.77\times10^{19}}{N_A}\times0.235\times(1+\alpha)\times365\mathrm{d}=1404.88\mathrm{Kg}$$

功率为 3.125×10^9W 的火电厂一年需要消耗标准煤的质量为：

$$\frac{3.125\times10^9}{29\mathrm{M}}\times365\mathrm{d}=3.40\times10^9\mathrm{Kg}$$

2、H 和 O 在 1eV 到 1000eV 能量范围内的散射截面近似为常数，分别为 38b 和 3.76b。计算 H_2O 的对数能降 ξ 以及 H_2O 中中子从 1000eV 慢化到 1eV 所需的平均碰撞次数。ξ_H=1.000,ξ_O=0.120。

答：将 H 和 O 的平均对数能降按照原子核数量与散射截面的乘积进行分配（相当于按照两种原子核的宏观散射截面进行分配），可以得到：

$$\xi=\frac{38\times2}{38\times2+3.76}\xi_H+\frac{3.76}{38\times2+3.76}\xi_O=0.96$$

慢化所需的平均碰撞次数为：

$$N=\frac{ln(1000/1)}{0.96}=7.20$$

3、设有一立方体反应堆，边长为 a=9m. 中子通量密度分布为：

$$\phi(x,y,z)=3\times10^{13}\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a})\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$$

已知 D=0.84×10^{-2}m,L=0.175m。试求：

1）$J(\vec{r})$ 的表达式；

答：简单起见，考虑 $\phi_0 = 3\times 10^{13}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$。

$$J(\vec{r}) = -D\nabla\phi(\vec{r}) \tag{1}$$
$$= -D\phi_0\nabla(\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a})) \tag{2}$$
$$=\frac{\pi D\phi_0}{a}(\sin(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}),\cos(\frac{\pi x}{a})\sin(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}),\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\sin(\frac{\pi z}{a})) \tag{3}$$

2）每秒从表面泄露的中子数；

答：考虑 $x = a/2$ 平面上的泄露：

$$J(a/2,y,z) = \frac{\pi D\phi_0}{a}(\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}),0,0)$$

每秒在该平面上泄露的中子数为：

$$\int_{-a/2}^{a/2}dz\int_{-a/2}^{a/2}dy\frac{\pi D\phi_0}{a}\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}) = \frac{4aD\phi_0}{\pi}$$

由六个面上的对称性可知，每秒从表面泄露的中子数为 $\frac{24aD\phi_0}{\pi}$。

3）每秒被吸收的中子数（假设外推距离可以忽略）。

答：

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \Rightarrow \Sigma_a = \frac{D}{L^2}$$

每秒被吸收的中子数为：

$$\int_{-a/2}^{a/2}dz\int_{-a/2}^{a/2}dy\int_{-a/2}^{a/2}dx\Sigma_a\phi \tag{4}$$
$$=\frac{D}{L^2}\phi_0(\frac{2a}{\pi})^3 \tag{5}$$
$$=\frac{8a^3D\phi_0}{\pi^3L^2} \tag{6}$$

4、设有一边长为 a=b=0.5m，c=0.6m（包括外推距离）的长方体裸堆，L=0.0434m，τ=6cm^2。

1）求达到临界状态所需的 k_∞;

答：

$$B_g^2 = (\frac{\pi}{a})^2 + (\frac{\pi}{b})^2 + (\frac{\pi}{c})^2 = 106.37\mathrm{m}^{-2}$$
$$k_\infty = 1 + B_g^2M^2 = 1 + B_g^2(L^2+\tau) = 1.26$$

2）如果反应堆功率为 5000KW，Σ_f=4.01m^{-1}, 求中子通量密度分布。（直角坐标系下，长方体反应堆的中子通量分布形式为 $\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{b})\cos(\frac{\pi z}{c})$）

答：设 $\phi = \phi_0 \cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{b})\cos(\frac{\pi z}{c})$, 由反应率的公式以及反应率和功率的关系，可以得到：

$$5000\text{KW} = 200\text{MeV} \times \Sigma_f \times \int \phi dV$$

$$\Rightarrow 5 \times 10^6 = 4.97 \times 10^{-12}\phi_0$$

$$\Rightarrow \phi_0 = 10^{18}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

三、论述题

1、描述反应性控制的任务和方式，并比较各种反应性控制方式的特点。

答：反应性控制的任务包括以下三类：

- 紧急控制：反应堆需要紧急停堆时，需要控制系统引入一个大的负反应性，快速停堆，并达到一定的停堆深度。
- 功率调节：外界负荷或堆芯温度变化时，需要控制系统引入适当的反应性调节反应堆功率。
- 补偿控制：反应堆运行过程中，剩余反应性不断减小，因此需要逐渐将控制毒物移出反应堆，以保持反应堆处于临界状态。

反应性控制的方式主要包括以下三种：

- 控制棒控制：使用中子吸收截面大的材料制作控制棒。该方式的优点是控制棒移动速度快，使用灵活，准确度高，主要用来控制反应性的快速变化。但每个控制棒都需要机械部件进行控制，并不经济。
- 固体可燃毒物控制：使用中子吸收截面大的可燃毒物控制反应性。
- 化学补偿控制：使用可溶性化学毒物替代补偿棒。该方式的优点是化学补偿毒物可均匀分布于堆芯中，能降低功率峰因子，提高平均功率密度。但是硼的浓度变化需要一定时间，因此该方式只能控制慢变化反应性。并且硼的浓度会显著影响慢化剂的温度系数。

2、阐述设计反应堆燃耗和换料周期的主要依据。

答：缩短停堆换料的时间和次数，延长运行的循环长度。

3、阐述在什么情况下会发生核的多普勒效应，证明多普勒展宽共振下的总面积基本与温度无关。

答：靶核处于热运动状态时会发生核的多普勒效应。多普勒展宽共振的横坐标为能量，纵坐标为相应能量值下的微观吸收截面。

2013 年硕士学位研究生入学考试试题（反应堆物理）

一、选择题（部分题目为多选题）

1、下面关于中子性质的说法，哪些是正确的？

A）在热中子反应堆中，中子的平均寿命约为 10 分钟。

B）中子的自旋量子数为 1/2。

C）在反应堆物理中，可以忽略中子的波动性，把中子当成一个粒子来描述。

D）快中子反应堆中，虽然中子运动的速度比较快，但是不需要考虑相对论效应。

答：A 选项错误，热中子反应堆中中子的平均寿期主要由扩散时间决定，数量级为 10^{-3}s,10 分钟是自由中子的半衰期。B 选项正确。C 选项正确。D 选项正确。

2、一座热功率为 500 万千瓦的核反应堆，满功率运行 1 年，消耗的 ^{235}U 约为：

A）6.2 克　B）6.35 吨　C）1.93 吨　D）2.27 吨

答：$\frac{500\times10^7}{200\mathrm{MeV}\times N_A}\times 0.235\times(1+\alpha)\times 365\mathrm{d} = 2.27\mathrm{t}$。

3、下列核素中，哪些是易裂变材料？

A）^{239}Pu　B）^{235}U　C）^{238}U　D）^{232}Th

答：AB。CD 需要通过转换才能变为易裂变核素。^{233}U、^{235}U 、^{239}Pu、^{241}Pu 为易裂变同位素，^{238}U、^{232}Th、^{240}Pu 为可裂变同位素。

4、关于反应堆的反射层，正确的说法有：

A）反应堆的反射层可以提高输出功率。

B）裸堆的中子通量密度分布，比带反射层反应堆的中子通量密度分布平坦。

C）带反射层的反应堆，使用较少的燃料即可达到临界状态。

D）可以使用水作为反射层。

答：A 选项正确，减少芯部中子泄露可以提高平均输出功率。B 选项错误，反射层能够使中子通量密度分布更加平坦。C 选项正确，因为反射层可以减少芯部中子泄露，使得芯部的临界尺寸可以更小，从而节省燃料。D 选项正确，水是良好的慢化剂材料，因此也可以作为反射层材料。

5、下面几个描述介质特征的物理量，最大的是：

A）扩散长度　B）慢化长度　C）徙动长度

答：徙动长度^2 = 扩散长度^2 + 慢化长度^2，因此 C 最大。

6、核裂变产生的中子，大部分为：

A）瞬发中子　B）缓发中子

答：A。

7、为使中子能量由 1MeV 降到 0.0253eV，中子需要与碳核碰撞多少次？设碳核的平均对数能降为 ξ_C=0.158。

A）25 次　B）2.5×10^7 次　C）111 次　D）115 次

答：$N = \frac{ln(10^6/0.0253)}{0.158} = 110.7$。

8、考虑无限介质中的中子，下面几个物理量最大的是：

A）慢化时间　B）扩散时间　C）中子寿命

答：中子寿命 = 扩散时间 + 慢化时间，因此 C 最大。

9、反应堆中，中子温度与介质温度相比，一般：

A）中子温度高　B）中子温度低　C）二者相等　D）不确定

答：中子温度一般大于介质温度，因为热中子由较高温度慢化而来，逐渐与介质形成热平衡。选 A。

10、对于 ___ 反应堆，稳态单群扩散方程解出的中子通量密度分布是真实的分布。

A）超临界　B）临界　C）次临界

答：选 B。因为稳态单群扩散方程可以解出非零的稳态解，而单群扩散方程的超临界解和次临界解均不符合这种解的条件。

二、名词解释

1、四因子公式

答："四因子公式"指 $k_\infty = \epsilon p f \eta$。几个参数解释如下：

- k_∞: 无限介质增殖因数
- ϵ: 快中子增殖因数，即一个初始裂变中子产生的、慢化到 ^{238}U 裂变阈能以下的平均中子数
- p: 逃脱共振俘获概率，即慢化过程中逃脱共振俘获的中子的份额
- f: 热中子利用系数，即燃料吸收的热中子与所有被吸收热中子（包括被燃料吸收的、被慢化剂吸收的、被冷却剂吸收的，等等）之比
- η: 有效裂变中子数，即燃料每吸收一个热中子产生的平均裂变中子数

2、点堆模型

答：点堆模型假定中子通量密度和先驱核浓度可以进行时间和空间的分离，即：

$$\begin{cases} \phi(\vec{r},t) = n(t)\varphi(\vec{r}) \\ C_i(\vec{r},t) = C_i(t) g_i(\vec{r}) \end{cases}$$

在这种假定下，堆内各点的中子密度随时间的涨落是同步的，就好像堆内各点的参数都可以用一个点来描述一样，因此被称为点堆模型。

3、功率分布展平

答：功率分布展平指将堆芯内功率峰因子降低，使功率分布变得平坦一些。实现功率分布展平的措施主要包括：

- 芯部分区布置（富集度高的燃料装在外区）
- 反射层
- 反应性控制（控制棒、可燃毒物、化学补偿等）

4、碘坑

答：停堆后 ^{135}Xe 的浓度先增大到最大值然后逐渐减小；剩余反应性先减小到最小值然后逐渐增大。这种现象被称为碘坑。

5、临界硼浓度

答：临界硼浓度指使反应堆保持在临界状态的硼浓度。

6、控制棒价值

答：控制棒价值指有控制棒时的反应性与无控制棒时的反应性之差。

三、简答题

1、裂变核反应堆是否会发生可比拟原子弹的核爆炸，瞬间释放出极大的能量？为什么？

答：不会。理由有以下几点：

- 反应堆中的核燃料浓度远低于原子弹中的核燃料浓度。
- 反应堆有负反馈机制，保持反应堆始终处于临界状态附近。

2、非均匀堆的均匀化计算包括哪些步骤？

答：非均匀堆的均匀化包括栅元均匀化、燃料组件均匀化、堆芯均匀化。

3、写出稳态单能中子扩散方程，并说明方程中每一项的物理意义。

答：稳态单能中子扩散方程如下：

$$S(\vec{r}) + D\nabla^2\phi(\vec{r}) - \Sigma_a\phi(\vec{r}) = 0$$

各项的物理意义如下：

- $S(\vec{r})$：中子产生率。
- $-D\nabla^2\phi(\vec{r})$：中子泄露率。
- $\Sigma_a\phi(\vec{r})$：中子吸收率。

4、简述斐克定律的使用条件。

答：斐克定律的适用条件有以下几条：

- 在实验室坐标系中散射各向同性。
- 在距离介质表面几个自由程以外。换言之，在距离真空边界两三个自由程以内斐克定律不再适用。
- 所讨论点的几个自由程附近，中子通量密度及其梯度缓慢变化。
- $\Sigma_a << \Sigma_s$ 的弱吸收介质。
- 不考虑中子源的贡献（该条可由第二条解释）。

四、计算题

1、在无限均匀非增殖介质内，每秒每单位体积产生 S 个中子。

1）求介质内中子通量密度分布。

答：首先给出稳态扩散方程：

$$D\nabla^2\phi(\vec{r}) - \Sigma_a\phi(\vec{r}) + S = 0$$

令 $\phi'(\vec{r}) = \phi(\vec{r}) - \frac{S}{\Sigma_a}$, 则有：

$$\frac{\nabla^2\phi'}{\phi'} = \frac{\Sigma_a}{D}$$
$$\Rightarrow \phi' \sim e^{ax+by+cz}$$
$$\Rightarrow \phi = \phi_0 e^{ax+by+cz} + \frac{S}{\Sigma_a}$$

其中 $a^2+b^2+c^2 = \frac{\Sigma_a}{D}$, 为了满足无穷远处（$r = +\infty, -\infty$）边界条件的限制，应有 $\phi_0 = 0$。

因此 $\phi = \frac{S}{\Sigma_a}$。

2）如果在 x=0 处插入一片无限大的薄平板吸收片（厚度 $t \to 0$, 宏观吸收截面为 Σ_a'）, 求中子通量密度分布。

答：由对称性，我们首先考虑 $x \geq 0$ 的部分，它可以分为 $0 < x < t/2, t/2 < x$ 两个部分。

和第一问的过程类似，我们可以给出两个部分的中子通量密度：

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_{10} e^{a_1 x + b_1 y + c_1 z} \\ \phi_2 = \phi_{20} e^{a_2 x + b_2 y + c_2 z} + \frac{S}{\Sigma_a} \end{cases}$$

由体系的对称性可知，ϕ 与 y, z 无关，因此可以得到：

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_{11} e^{a_1 x} + \phi_{12} e^{-a_1 x}, -t/2 < x < t/2 (\text{这是因为板内扩散方程形式相同}) \\ \phi_2 = \phi_{20} e^{a_2 x} + \frac{S}{\Sigma_a}, x > t/2 \end{cases}$$

根据 $x = 0$ 处中子流密度为 0（$\phi_{11} = \phi_{12}$）、$x = t/2$ 处通量密度连续、$x = t/2$ 处中子流密度连续，可得到以下边界条件：

$$\begin{cases} \phi_{11} e^{a_1 t/2} + \phi_{11} e^{-a_1 t/2} = \phi_{20} e^{a_2 t/2} + \frac{S}{\Sigma_a} \\ D'(a_1 \phi_{11} e^{a_1 t/2} - a_1 \phi_{11} e^{-a_1 t/2}) = D(a_2 \phi_{20} e^{a_2 t/2}) \end{cases}$$

考虑到 $t \to 0$, 并且实际上我们不需要求 ϕ_{11}, 因此上述方程组可直接用泰勒展开保留至一阶进行求解：

$$\begin{cases} 2\phi_{11} = \phi_{20}(1 + a_2 t/2) + \frac{S}{\Sigma_a} \\ 2D' a_1 \phi_{11} a_1 t/2 = D a_2 \phi_{20} (1 + a_2 t/2) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{D' a_1^2 t S}{2\Sigma_a} = (1 + a_2 t/2)(D a_2 - D' a_1^2 t/2)\phi_{20} \approx D a_2 \phi_{20}$$

$$\Rightarrow \phi_{20} = -\frac{S \Sigma_a' t}{2\Sigma_a \sqrt{\Sigma_a D}}$$

2、考虑一个芯部半径为 R，带有厚度为 T（含外推距离）的反射层的球形堆。用单群理论求出临界方程和中子通量密度。

答：首先可以给出芯部和反射层内的中子扩散方程：

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi_c(\vec{r}) + B_c^2 \phi_c(\vec{r}) = 0 \\ \nabla^2 \phi_r(\vec{r}) - k_r^2 \phi_r(\vec{r}) = 0 \end{cases}$$

其中 $B_c^2 = (\frac{k_\infty}{k} \Sigma_{ac} - \Sigma_{ac})/D_c, k_r^2 = \Sigma_{ar}/D_r$。

然后可给出以上两个方程的通解：

$$\begin{cases} \phi_c(\vec{r}) = A \frac{\sin(B_c r)}{r}, (\text{堆芯内中子通量密度为有限值}) \\ \phi_r(\vec{r}) = C' \frac{\sinh(k_r r)}{r} + A' \frac{\cosh(k_r r)}{r} \end{cases}$$

然后列出边界条件如下：

$$\begin{cases} \phi_r(r=R+T)=0 \\ \phi_c(r=R)=\phi_r(r=R) \\ D_c\phi_c'(r=R)=D_r\phi_r'(r=R) \end{cases}$$

可得到以下方程组：

$$\begin{cases} C'\frac{\sinh(k_r(R+T))}{R+T}+A'\frac{\cosh(k_r(R+T))}{R+T}=0 \\ A\frac{\sin(B_cR)}{R}=C'\frac{\sinh(k_r(R))}{R}+A'\frac{\cosh(k_r(R))}{R} \\ D_cA(\frac{B_c\cos(B_cR)}{R}-\frac{\sin(B_cR)}{R^2})=D_rC'(-\frac{k_r\cosh(k_rT)}{R}-\frac{\sinh(k_rT)}{R^2}) \end{cases}$$

由该方程组可以解出反应堆的临界条件以及各处的中子通量密度。

3、高为 H，半径为 R 的均匀圆柱形裸堆，其几何曲率为：

$$B_g^2=(\frac{\pi}{H})^2+(\frac{2.405}{R})^2$$

试求最小临界体积 V 与材料曲率 B_m^2 的关系。

答：处于临界状态时，有 $B_g^2=B_m^2$, 即：

$$B_m^2=(\frac{\pi}{H})^2+(\frac{2.405}{R})^2$$

我们有待优化函数 $V=\pi R^2H$, 因此求临界体积的最小值是一个带约束的优化问题。我们可以用拉格朗日乘子法解之：

$$\mathcal{L}=\pi R^2H+\lambda(B_m^2-(\frac{\pi}{H})^2-(\frac{2.405}{R})^2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial R}=2\pi RH+\frac{2\times2.405^2\lambda}{R^3}=0 \\ \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial H}=\pi R^2+\frac{2\pi^2\lambda}{H^3}=0 \\ B_m^2=(\frac{\pi}{H})^2+(\frac{2.405}{R})^2 \end{cases}$$

将 R,H 用 B_m^2 表示出来，再带回体积的表达式即可。

物理常数：

阿伏伽德罗常数 N_A=6.02×10^{23}mol^{-1}

光速 c=3×10^8m/s

电子电荷 e=1.602×10^{-19}C

原子单位 1u=1.66×10^{-27}Kg

^{235}U 的俘获-裂变比 $\alpha=\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_f}=0.169$

2014 年硕士学位研究生入学考试试题（反应堆物理）

一、选择题（部分题目为多选题）

1、当两组控制棒同时插入反应堆时，其总价值 ___ 两组控制棒单独插入反应堆时的价值之和。

A）大于　B）等于　C）小于　D）ABC 都有可能

答：选 D。

2、水在压水堆中起什么作用？

A）冷却剂　B）慢化剂　C）反射层　D）溶剂

答：水在压水堆中一般起冷却剂和慢化剂的作用，且可用作慢化剂的材料一般也可用作反射层材料。水也可用作溶剂（溶解硼酸）。因此选 ABCD。

3、关于温度上升对共振峰的影响，下列说法正确的有：

A）共振峰降低　B）空间自屏效应减弱
C）反应性上升　D）整个过程形成正反馈

答：A 选项正确，温度升高会使共振峰展宽，峰值降低。B 选项正确，温度升高导致共振俘获的能量范围增大，外层燃料吸收共振中子数量增加，燃料外层逃脱共振俘获概率减小、反应性降低，（即燃料的里层和外层反应性差距减小），导致空间自屏效应减弱。C 选项错误，温度系数可能为正或负，因此温度升高反应性可能上升也可能下降。D 选项错误，温度系数为负则会形成负反馈。

4、压水堆堆芯的均匀化过程不包括哪个步骤？

A）堆芯均匀化　B）慢化剂均匀化
C）栅元均匀化　D）组件均匀化

答：均匀化的步骤从小到大依次为栅元均匀化、组件均匀化、堆芯均匀化，不包括慢化剂均匀化。

5、下列哪些量与核反应率不是正比关系？

A）平均自由程　　B）微观截面
C）宏观截面　　　D）中子通量密度

答：平均自由程和宏观截面成反比关系，因此也和核反应率成反比关系。

6、关于缓发中子，下面说法正确的有：

A）缓发中子的速度比较慢，瞬发中子的速度比较快。

B）缓发中子的能量低，瞬发中子的能量高。

C）缓发中子在裂变中子中所占份额小，瞬发中子所占份额大。

D）缓发中子在反应堆动力学中的作用可以忽略不计。

答：AB 选项正确，缓发中子的平均能量低于瞬发中子。C 选项正确。D 选项错误，缓发中子对反应堆的动态特性有重要影响。

7、H 元素和 O 元素的中子散射截面分别为 38b 和 3.76b，平均对数能降分别为 1.00 和 0.12，则水分子 H_2O 的平均对数能降为：

A）0.96　B）0.71　C）0.56　D）2.12

答：$\xi = \frac{38\times2}{38\times2+3.76}\xi_H + \frac{3.76}{38\times2+3.76}\xi_O = 0.96$。

8、好的慢化剂应该具有较大的：

A）慢化能力　B）慢化比　C）密度　D）慢化时间

答：好的慢化剂应具有较大的慢化能力和慢化比。其他两个参数教材未提及。

二、判断题

1、对于超临界反应堆，稳态单群扩散方程解出的中子通量密度分布是真实的分布。

答：错误。

2、包有反射层的反应堆，其芯部的中子通量密度分布，比裸堆的中子通量密度分布更加平

坦。

答：正确。

3、包有反射层的反应堆，为了达到临界状态，需要使用的燃料较少。

答：正确。

4、在反应堆的核计算中，因为双群理论的误差太大，实际计算时大多采用多群理论。

答：错误。对于热中子反应堆，双群理论的计算结果就可以满足工程精度要求。

5、由反应堆的单群扩散方程和边界条件，可以计算出反应堆的功率。

答：错误。扩散方程仅仅给出中子通量密度的形式，但并未确定表达式前的系数，因此它可以缩放任意倍大小。并且，不同的核燃料有不同的裂变能，即使在相同的核反应率下也可能有不同的功率。

6、为了安全，选择慢化剂/燃料比例时，必须使反应堆运行在欠慢化区。

答：正确。只有让反应堆运行在欠慢化区（慢化剂/燃料比例 $- k_\infty$ 曲线中，k_∞ 极大值左侧的部分），这样才能在温度升高时，让 k_∞ 下降，保证反应堆是安全的。（否则温度升高的同时无限增殖因数增大，形成正反馈。）

7、添加硼酸过量，会使反应堆处于不安全的温度正反馈状态。

答：正确。在反应堆工作温度下，硼浓度大于 $1300\mu g/g$ 时会出现正慢化剂温度系数，即出现温度正反馈状态。

三、名词解释

1、空泡系数

答：空泡系数指反应堆中冷却剂的空泡份额变化百分之一引起的反应性的变化。（空泡份额指冷却剂中包含的蒸汽泡的体积百分数）

2、几何曲率和材料曲率

答：几何曲率 B_g^2 指中子扩散方程的最小特征值，它只和反应堆的几何形状、几何尺寸有关。材料曲率 B_m^2 指满足临界方程 $\frac{k_\infty}{1+L^2B_m^2}=1$ 的 B_m^2 值，它只和反应堆的材料特性有关。计算反应堆的临界状态就是要计算在何时几何曲率等于材料曲率。

3、平均卸料燃耗深度

答：卸料燃耗深度指从堆芯中卸出的燃料所达到的燃耗深度。平均卸料燃耗深度指各个燃料组件的燃耗深度的平均值。

4、直线外推距离

答：直线外推距离指反应堆外一个假想的距离 d，在该距离处，中子通量密度为零。一般取 $d=-\frac{\phi(a)}{\phi'(a)}$, a 为反应堆边界。

5、平衡氙浓度和平衡氙中毒

答：平衡氙浓度指随着反应堆运行，氙含量达到饱和时的浓度（即 $N_{Xe}(\infty)$）。平衡氙中毒指平衡氙浓度引起的反应性的变化值。

四、简答题

1、热中子反应堆的无限介质增殖因数，与哪些因数有关？

答：$k_\infty=\epsilon pf\eta$, 它们分别是快中子增殖因数、逃脱共振俘获概率、热中子利用系数、有效裂变中子数。

2、什么是线性倍增时间和指数倍增时间？二者有什么关系？

答：线性倍增时间 T_{Dl} 指把反应堆增殖产生的易裂变同位素取出，暂时不利用，直到产生的易裂变同位素达到初始裂变材料的装载量所需的时间。指数倍增时间 T_{De} 指把反应堆增殖产生的易裂变同位素立即投入到新的反应堆中加以利用，直到产生的易裂变同位素达到初始裂变材料的装载量所需的时间。T_{De}=$ln2T_{Dl}$。

3、在分群扩散理论中，如何计算出多群常数和少群常数？

答：计算多群常数常常忽略中子通量密度的空间变化。以物理量 Y 为例，它的计算方式为：

$$Y_g = \frac{\int Y(E)\phi(E)dE}{\phi_g}, g\text{为能群}$$

计算少群常数需要使用多群常数，并按照中子通量密度的份额进行分配。以物理量 Y 为例，它的计算方式如下：

$$Y_g = \frac{\sum_{n\in g} Y_n\phi_n}{\sum_{n\in g}\phi_n}, g\text{为大能群}, n\text{为小能群}$$

五、计算题

1、设有一立方体反应堆，边长为 a=9m（含外推距离）。中子通量密度分布为：

$$\phi(x,y,z) = \phi_0\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a})\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$$

坐标原点在立方体的中心。已知 D=0.84$\times10^{-2}$m,L=0.175m. 试求：

1）$J(\vec{r})$ 的表达式；

答：简单起见，首先考虑 ϕ_0 包含了通量密度的单位。

$$J(\vec{r}) = -D\nabla\phi(\vec{r}) \tag{7}$$
$$= -D\phi_0\nabla(\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a})) \tag{8}$$
$$=\frac{\pi D\phi_0}{a}(\sin(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}),\cos(\frac{\pi x}{a})\sin(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}),\cos(\frac{\pi x}{a})\cos(\frac{\pi y}{a})\sin(\frac{\pi z}{a})) \tag{9}$$

2）每秒从表面泄露的中子数；

答：考虑 $x = a/2$ 平面上的泄露：

$$J(a/2,y,z) = \frac{\pi D\phi_0}{a}(\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}),0,0)$$

每秒在该平面上泄露的中子数为：

$$\int_{-a/2}^{a/2}dz\int_{-a/2}^{a/2}dy\frac{\pi D\phi_0}{a}\cos(\frac{\pi y}{a})\cos(\frac{\pi z}{a}) = \frac{4aD\phi_0}{\pi}$$

由六个面上的对称性可知，每秒从表面泄露的中子数为 $\frac{24aD\phi_0}{\pi}$。

3）每秒被吸收的中子数（假设外推距离可以忽略）。

答：

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \Rightarrow \Sigma_a = \frac{D}{L^2}$$

每秒被吸收的中子数为：

$$\int_{-a/2}^{a/2} dz \int_{-a/2}^{a/2} dy \int_{-a/2}^{a/2} dx \Sigma_a \phi \tag{10}$$

$$= \frac{D}{L^2}\phi_0 (\frac{2a}{\pi})^3 \tag{11}$$

$$= \frac{8a^3 D\phi_0}{\pi^3 L^2} \tag{12}$$

2、如图所示，一维无限平板反应堆的中间区域（I）厚度为固定值 2b，k_∞^I=1; 两侧区域（II）k_∞^{II}>1。

1）用单群理论求出临界尺寸 a。

2）给出临界时的中子通量密度分布。

答：首先给出中子的单群扩散方程：

$$\frac{1}{v}\frac{\partial \phi}{\partial t} = D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + k_\infty \Sigma_a \phi + S_0$$

因为本题仅讨论临界状态,因此可认为 ϕ 不含时。同时由于对称性,可认为 $\phi = \phi(x) = \phi(-x)$。本题中，$S_0 = 0$。首先考虑 $x > 0$ 的部分，对于 I 区域和 II 区域，可以分别给出以下方程：

$$\begin{cases} D_1 \nabla^2 \phi_1 = 0, 0 < x < b \\ D_2 \nabla^2 \phi_2 - \Sigma_a \phi_2 + k_\infty^{II} \Sigma_a \phi_2 = 0, b < x < b + a \end{cases}$$

得到两个区域中子通量密度的通解为：

$$\begin{cases} \phi_1(x) = C, 0 < x < b \\ \phi_2(x) = A\cos(\frac{\sqrt{k_\infty^{II}-1}}{L}x) + B\sin(\frac{\sqrt{k_\infty^{II}-1}}{L}x), b < x < b + a \end{cases}$$

其中 $L = \sqrt{\frac{D_2}{\Sigma_a}}$，材料曲率 $B_m^2 = \frac{k_\infty^{II}-1}{L^2}$。接下来给出边界条件：

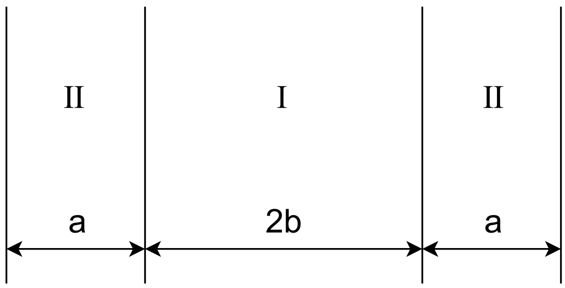
$$\begin{cases} \phi_1(b) = \phi_2(b) \\ D_1\phi_1'(b) = D_2\phi_2'(b) \\ \phi_2(b + a) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \phi_1(x) = A \\ \phi_2(x) = A\cos(B_m(x - b)) \end{cases}$$

$$\Rightarrow A\cos(B_m a) = 0$$

$$\Rightarrow B_m = \frac{(2n+1)\pi}{2a}, n = 0, 1, 2, ...$$

临界状态要求最小特征值满足上述条件，因此 $a = \frac{\pi}{2B_m} = \frac{\pi L}{2\sqrt{k_\infty^{II}-1}}$。将求出的特征值带回通解即得到中子通量密度的分布。



物理常数：

阿伏伽德罗常数 N_A=6.02×10^{23}mol^{-1}

光速 c=3×10^{8}m/s

电子电荷 e=1.602×10^{-19}C

原子单位 1u=1.66×10^{-27}Kg

2015 年硕士学位研究生入学考试试题（反应堆物理）

一、选择题（部分题目为多选题）

1、下面关于点堆模型的说法，正确的有：

A）点堆模型求得的中子通量密度峰值与实际峰值相等。

B）可以用来分析压水堆的弹棒事故。

C）可适用于偏离临界状态不远，并且扰动不太大的问题。

D）没有考虑中子通量密度的空间分布随时间的涨落。

答：A 选项错误，实际的中子通量密度不能时空分离，使用点堆模型求得的中子通量密度峰值将远低于实际情况。B 选项错误，由于控制棒的弹出或卡出，局部反应性的扰动将引起功率密度空间的重大扰动。C 选项正确。D 选项正确。

2、中子通量密度与下面哪些物理量有关？

A）中子速度　　B）中子质量

C）中子自旋角动量　　D）中子浓度

答：$\phi = nv$, 即与中子速度和中子浓度相关。

3、中子的平均自由程

A）与微观截面成反比　　B）与宏观截面成正比

C）与靶核的数密度有关　　D）与吸收截面严格成反比关系

答：$\lambda = \frac{1}{\Sigma} = \frac{1}{n_t \sigma}$, 因此 AC 正确，B 错误。由于还有裂变截面等其他截面，因此 D 选项错误。

4、处于临界状态的裂变核反应堆中，中子温度

A）比介质温度高　　B）比介质温度低

C）与介质温度相等　　D）三种情况都有可能

答：中子温度一般高于介质温度。

5、当反应堆中的硼浓度超过临界硼浓度时

A）反应堆处于超临界状态　　B）反应堆处于次临界状态
C）反应堆处于正反馈状态　　D）反应堆工作在欠慢化区

答：A 选项错误，硼浓度高于临界浓度时，反应性小于零，为次临界状态。B 选项正确。CD 选项错误，硼浓度超过一定阈值时，可能出现正温度系数，但也可能不出现；可能让反应堆工作在欠慢化区，也可能让反应堆工作在过慢化区。

6、反应堆停堆时，^{135}Xe 的主要来源是：

A）燃料核裂变后直接产生　　B）^{135}I 的衰变
C）氙同位素的衰变　　D）^{135}Te 的衰变

答：停堆后 ^{135}Xe 的主要来源是 ^{135}I 的衰变。

二、名词解释

1、徙动长度

答：徙动长度表征了中子由产生到被吸收所穿行的直线距离，徙动面积 $M^2 = \frac{1}{6}\overline{r_M^2}$。

2、反应堆周期

答：考虑中子密度 $n(t) \sim e^{\omega t}$, 则称中子密度变化 e 倍（可能是增大至 e 倍或减小至 $\frac{1}{e}$）所需的时间为反应堆周期，即 $T = \frac{1}{\omega}$。更一般地，我们可以定义反应堆周期为 $T = \frac{n(t)}{\frac{dn(t)}{dt}}$。

3、总的被控反应性

答：总的被控反应性指剩余反应性与停堆深度之和。

4、缓发中子先驱核

答：缓发中子先驱核指在衰变过程中能产生缓发中子的裂变碎片。

5、空间自屏效应

答：空间自屏效应指非均匀堆中，燃料块里层的燃料核没有办法充分吸收热中子的效应（即

外层燃料核对里层燃料核起到了屏蔽作用)。

三、简答题

1、什么是控制棒间的干涉效应?

答:控制棒间的干涉效应指反应堆中多个控制棒的总的价值并不等于各个控制棒单独插入反应堆的价值之和,即控制棒引起的中子通量密度分布的畸变会影响其他控制棒的价值。

2、什么是强迫停堆时间?怎样减小强迫停堆时间?

答:强迫停堆时间指停堆之后,由于氙浓度的增加导致剩余反应性小于零的时间,这段时间内反应堆无法启动。减小强迫停堆时间可以通过逐渐降低功率的方式来停堆,这样可以让碘坑深度变浅。

3、非均匀堆的均匀化计算包含哪些步骤?

答:非均匀堆的均匀化包括栅元均匀化、燃料组件均匀化、堆芯均匀化。

4、怎样提高反应堆的平均卸料燃耗深度?

答:

- 采用不同富集度的核燃料分区装料
- 采用化学补偿液或可燃毒物提高剩余反应性和展平功率分布

四、计算题

1、设有一强度为 I 的平行中子束垂直射入厚度为 a(含外推距离)的无限大平板上。求:

1)中子不受碰撞穿过平板的概率。

答:假设中子入射到 $x=0$ 平面上,从 $x=a$ 平面穿出。由微观截面的定义可知:

$$I(x) = Ie^{-\Sigma_t x}$$

此处的 $\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$, 它包含了中子被碰撞的所有情况。

因此中子不受碰撞穿过平板的概率为 $\frac{Ie^{-\Sigma_t a}}{I} = e^{-\Sigma_t a}$。

2）平板内的中子通量密度分布。

答：首先给出中子的单群扩散方程：

$$D\nabla^2\phi(x) - \Sigma_a\phi(x) = 0$$
$$\Rightarrow \phi(x) = Aexp(\frac{x}{\sqrt{D/\Sigma_a}}) + Bexp(-\frac{x}{\sqrt{D/\Sigma_a}})$$

然后给出边界条件 (真空边界处的中子流密度连续不成立):

$$\begin{cases} \phi(0) = I \\ \phi(a) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A + B = I \\ Aexp(\frac{a}{\sqrt{D/\Sigma_a}}) + Bexp(-\frac{a}{\sqrt{D/\Sigma_a}}) = 0 \end{cases}$$

求解出 A, B 即可得到平板内的中子通量密度分布。

3）中子扩散最终穿过平板的概率。

答：由第二问的中子通量密度可给出边界处的中子流密度，进而给出中子穿出平板的概率 $P = \frac{J(a)}{J(0)}$。再用 P 减去无碰撞穿出平板的概率 $e^{-\Sigma_t a}$ 即可得到中子扩散最终穿出平板的概率。

2、考虑高度为 H，半径为 R 的圆柱形反应堆，在侧面带有厚度为 T 的反射层（H，T 均包含了外推距离）。中心区为通量密度展平区，要求中子通量密度沿径向等于常数。假定单群理论可以适用，反应堆处于临界状态，求：

1）中心区的 k_∞。

答：以圆柱体几何中心为坐标原点建立柱坐标系。由于中子通量密度沿径向为常数，因此可以设中心区的中子通量密度为 $\phi_1 = \phi_1(z)$。然后可给出其单能扩散方程：

$$\nabla^2\phi_1 + \frac{k_\infty - 1}{L^2}\phi_1 = 0$$

边界条件为 $\phi_1(H/2) = \phi_1(-H/2) = 0, \phi_1'(0) = 0$, 因此:

$$\begin{cases} \phi_1(z) = A\cos(B_m z) \\ \frac{B_m H}{2} = \frac{2n+1}{2}\pi, n = 0, 1, 2, ... \end{cases}$$

临界状态要求方程的最小特征值满足上式，因此：

$$k_\infty = \frac{\pi^2 L^2}{H^2} + 1$$

2）临界条件的判别式。

答：和第一问结果一致，为 $k_\infty = \frac{\pi^2 L^2}{H^2} + 1$。

3）中子通量密度分布。

答：由第一问可知 $B_m = \frac{\pi}{H}$, 因此中心区中子通量密度为 $\phi_1(z) = A\cos(B_m z) = A\cos(\frac{\pi}{H} z)$。

3、一反应堆每秒钟蒸发 800 升水。设发电效率为 40%，则该反应堆每年需要消耗多少公斤 ^{235}U？假设水温为 20℃。

答：相当于每秒有 800 升水从 20℃ 升温至 100℃ 然后被气化，因此每秒释放的裂变能为：

$$800 \times 10^3 \mathrm{g} \times (4.2 \times 80 + 2260) = 2.0768 \times 10^9 \mathrm{J}$$

一年消耗的 ^{235}U 为：

$$\frac{2.0768 \times 10^9 \mathrm{J}}{200\mathrm{MeV} \times N_A} \times 0.235 \times (1 + \alpha) \times 365\mathrm{d} = 933.65\mathrm{Kg}$$

4、H 和 O 在 1eV 到 1000eV 能量范围内的中子散射截面近似为常数，分别为 38b 和 3.76b。计算 H_2O 的对数能降 ξ 以及 H_2O 中中子从 1000eV 慢化到 1eV 所需的平均碰撞次数。ξ_H=1.000,ξ_O=0.120。

答：将 H 和 O 的平均对数能降按照原子核数量与散射截面的乘积进行分配（相当于按照两种原子核的宏观散射截面进行分配），可以得到：

$$\xi = \frac{38 \times 2}{38 \times 2 + 3.76}\xi_H + \frac{3.76}{38 \times 2 + 3.76}\xi_O = 0.96$$

慢化所需的平均碰撞次数为：

$$N = \frac{ln(1000/1)}{0.96} = 7.20$$

物理常数：

阿伏伽德罗常数 N_A=6.02×10^{23}mol^{-1}

光速 c=3×10^8m/s

电子电荷 e=1.602×10^{-19}C

原子单位 1u=1.66×10^{-27}Kg

^{235}U 核每次裂变释放的可利用能量为 200MeV

^{235}U 的俘获-裂变比 α=0.169

水的比热：4.2J/(g $\cdot$ K)

水的汽化热：2260J/g