The Exercise of
Nuclear Reactor Physics

核反应堆物理课后习题

一小块浓缩铀 & 刘Sir

写在前面

《核反应堆物理》是西安交通大学核工程专业学生在大三下学期的必修课，旨在通过模拟核反应堆内中子与原子核的相互作用过程，为堆芯核设计、堆芯燃料管理、核反应堆运行、核反应堆启动试验、核反应堆安全分析等提供中子学基础数据。

这门课的期末考试题目主要来自于课本例题以及课后习题，课本例题已经由原书给出解答，我们希望通过这份资料给出课后习题的解答，帮助学习这门课的同学更好地完成作业以及高效的期末复习备考。

这份解答主要由 一小块浓缩铀 撰稿及排版，由 刘 Sir 审核。因为我们水平有限，错漏之处在所难免，如果您发现有计算错误、笔误或其他需要改进之处，可以前往 GitHub 项目地址提供 Issue 或直接联系微信：

- : https://github.com/Enriched-Uranium/Nuclear-Reactor-Physics
- : XJTU-NEer

一小块浓缩铀 & 刘 Sir

2023 年 3 月 14 日

目录

Chapter 1

绪论

习题

【题 1.1】 什么是核反应堆? 按照核反应堆发生的机理可分为哪几类? 按照堆内的中子能谱可分为哪几类? 按照冷却剂和慢化剂的种类可分为哪几类?

解.

(1) 核反应堆是指能以可控方式实现自持的链式裂变反应或核聚变反应的装置.

(2) 按照核反应堆发生的机理，核反应堆可分为裂变核反应堆、聚变核反应堆和聚变-裂变混合堆.

(3) 按照堆内的中子能谱，核反应堆可分为热中子堆和快中子堆.

(4) 按照冷却剂和慢化剂的种类，核反应堆可分为轻水堆 (压水堆和沸水堆)、重水堆、气冷堆、液态金属堆等.

□

【题 1.2】 核反应堆物理分析的主要目标是什么?

解. 核反应堆物理分析的主要目标是通过模拟核反应堆内中子与原子核的相互作用过程，为堆芯核设计、堆芯燃料管理、核反应堆运行、核反应堆启动试验、核反应堆安全分析等提供中子学基础数据. □

Chapter 2

核反应堆核物理基础

习题

【题 2.1】 名词解释: 易裂变核素, 可转换核素, 核反应率, 中子注量率.

解.

(1) 易裂变核素: 可用任意小能量的中子引发裂变的核素, 如 ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu 等.

(2) 可转换核素: 可裂变核素俘获中子后经历一系列衰变成为易裂变核素, 这样的可裂变核素成为可转换核素.

(3) 核反应率: 单位时间单位体积内所有中子与介质原子核发生反应的次数, 即

$$R = \Sigma\phi = \Sigma nv \quad (\mathrm{m^{-3}\cdot s^{-1}})$$

(4) 中子注量率: 中子密度和中子速率的乘积, 单位时间单位面积上的中子数, 即

$$\phi = nv \quad (\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}})$$

□

【题 2.2】 在 ^{235}U 的裂变反应所发射的中子中, 缓发中子的份额为 (0.0065).

【题 2.3】 密度为 1000 kg/m^3 的水对于能量为 0.0253 eV 的中子的宏观吸收截面约为多少? (已知 H, O 的热中子微观吸收截面分别为 0.332 b 和 0.00027 b, 阿伏伽德罗常数为 6.022×10^{23})

解. 水的相对分子质量为

$$M_{\mathrm{H_2O}} = 2\times1.00797 + 1\times15.9994 = 18.0153$$

单位体积内氧原子个数

$$N_{\mathrm{O}} = N_{\mathrm{H_2O}} = \frac{\rho N_{\mathrm{A}}}{M_{\mathrm{H_2O}}} = \frac{10^6\times6.022\times10^{23}}{18.0153} = 3.343\times10^{28}\,\mathrm{m^{-3}}$$

单位体积内氢原子个数

$$N_{\mathrm{H}} = 2N_{\mathrm{O}} = 2\times3.343\times10^{28} = 6.686\times10^{28}\,\mathrm{m^{-3}}$$

于是

$$\Sigma_{\mathrm{a,\,H_2O}} = N_{\mathrm{H}}\sigma_{a,H} + N_{\mathrm{O}}\sigma_{a,O} = 6.686\times0.332 + 3.343\times0.00027\,\mathrm{m^{-1}} = 2.221\,\mathrm{m^{-1}}$$

□

【题 2.4】 某压水堆采用 UO_2 作燃料, 其质量富集度为 2.43%, 密度为 $1.0\times10^4\,\mathrm{kg/m^3}$, 试计算: 当中子能量为 0.0253 eV 时, UO_2 的宏观吸收截面和宏观裂变截面 (假设铀只有 ^{235}U 和 ^{238}U, 氧均为 ^{16}O).

解. 设 ^{235}U 原子核所占比例为 c_5, 则

$$c_5 = \left[1 + 0.9874\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)\right]^{-1} = \left[1 + 0.9874\left(\frac{1}{0.0243} - 1\right)\right]^{-1} = 0.024602$$

UO_2 相对分子质量

$$M_{UO_2} = 235c_5 + 238(1-c_5) + 16\times 2 = 269.93$$

UO_2 单位体积分子数

$$N_{UO_2} = \frac{\rho N_A}{M_{UO_2}} = \frac{10^4\times 6.022\times 10^{23}}{269.93}\,\mathrm{m^{-3}} = 2.231\times 10^{28}\,\mathrm{m^{-3}}$$

则

$$\begin{aligned} N_5 &= c_5 N_{UO_2} = 0.05489\times 10^{28}\,\mathrm{m^{-3}} \\ N_8 &= (1-c_5)N_{UO_2} = 2.176\times 10^{28}\,\mathrm{m^{-3}} \\ N_O &= 2N_{UO_2} = 4.462\times 10^{28}\,\mathrm{m^{-3}} \end{aligned}$$

对于能量为 0.0253 eV 的中子,查附录 3 得,$\sigma_{a,U_5} = 680.9\,\mathrm{b}$, $\sigma_{f,U_5} = 584.8925\,\mathrm{b}$, $\sigma_{a,U_8} = 2.7\,\mathrm{b}$, $\sigma_{a,O} = 2.7\times 10^{-4}\,\mathrm{b}$,故

$$\begin{aligned} \Sigma_{a,UO_2} &= N_5\sigma_{a,U_5} + N_8\sigma_{a,U_8} + N_O\sigma_{a,O} = 43.25\,\mathrm{m^{-1}} \\ \Sigma_{f,UO_2} &= N_5\sigma_{f,U_5} = 32.10\,\mathrm{m^{-1}} \end{aligned}$$

□

【题 2.5】 为得到 1 kWh 的能量,需要多少质量的 ^{235}U 发生裂变?

解. 设需要 m kg 的 ^{235}U 发生裂变,则

$$\frac{m\times 10^3}{235}\times 6.022\times 10^{23}\times 200\times 10^6\times 1.6\times 10^{-19} = 10^3\times 3600 \quad (\mathrm{J})$$

解得

$$m = 4.390\times 10^{-8}\,\mathrm{kg}$$

□

【题 2.6】 有一座小型核电厂,电功率为 150 MW,设电厂的效率 (电功率与热功率的比值) 为 30%. 假设发生裂变的核素为纯 ^{235}U,且每次裂变释放出的能量为 200 MeV,试估算该电厂核反应堆额定功率运行 1 h 所消耗的 ^{235}U 量.

解. 设该电厂核反应堆额定功率运行 1 h 消耗 ^{235}U 的质量为 m kg,取俘获-裂变比 $\alpha = 0.17$,则

$$\frac{1}{1+\alpha}\cdot\frac{m\times 10^3}{235}\times 6.022\times 10^{23}\times 200\times 10^6\times 1.6\times 10^{-19}\times 30\% = 150\times 10^6\times 3600 \quad (\mathrm{J})$$

解得

$$m = 0.02568\,\mathrm{kg}$$

□

【题 2.7】 一座电厂的额定电功率 P_e 为 1000 MW,效率 η_e(电功率与热功率的比值) 为 32%,年负荷因子 η(实际年发电量与额定年发电量的比值) 为 0.85.

(1) 若该电厂为核电厂,假设发生裂变的核素为纯 ^{235}U,且每次裂变释放出的能量为 200 MeV,试估算该电厂一年需要消耗多少吨 ^{235}U?

(2) 若该电厂为火电厂,已知标准煤的发热值为 $Q = 29.271\,\mathrm{MJ/kg}$,试估算该电厂一年需要消耗多少吨标准煤?

解.

(1) 设该电厂一年需要消耗 m 吨 ^{235}U,取俘获-裂变比 $\alpha = 0.17$,则

$$\frac{1}{1+\alpha}\cdot\frac{m\times 10^6}{235}\times 6.022\times 10^{23}\times 200\times 10^6\times 1.6\times 10^{-19}\times 32\% = 0.85\times 1000\times 10^6\times 365\times 24\times 3600 \quad (\mathrm{J})$$

解得

$$m = 1.195\,\mathrm{t}$$

(2) 设该电厂一年需要消耗 M 吨标准煤，显然有 $\eta_e MQ = \eta P_e t$，即

$$32\% M \times 10^3 \times 29.271 \times 10^6 = 0.85 \times 1000 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 \quad (\mathrm{J})$$

解得

$$M = 2.8618 \times 10^6\ \mathrm{t}$$

□

【题 2.8】 在纯水慢化剂中加了一些硼酸 H_3BO_3，使其热中子吸收截面增加了 10%，若已知水的宏观热中子吸收截面为 $\Sigma_{水} = 0.0221\,\mathrm{cm}^{-1}$，硼酸的微观热中子吸收截面为 $\sigma_{硼酸} = 756\,\mathrm{b}$ 和天然硼的相对原子质量 $A_B = 10.82$，试求此时慢化剂中的硼浓度 C_B 为多少 ppm(1 ppm 的硼浓度是指 1 kg 水中含 1 mg 的天然硼)？

解. 设硼酸浓度为 $C_{H_3BO_3}$ mg/(kg水)，近似认为慢化剂密度仍然为水的密度 $\rho = 10^3\,\mathrm{kg/m^3}$，则

$$N_{H_3BO_3} = \frac{\rho C_{H_3BO_3} \times 10^{-3} \times N_A}{M_{H_3BO_3}}$$

而

$$M_{H_3BO_3} = 3 \times 1.00797 + 10.82 + 3 \times 15.9994 = 29.84331$$

由题意，$N_{H_3BO_3}\sigma_{H_3BO_3} = 0.1\Sigma_{水}$，于是

$$N_{H_3BO_3} = \frac{0.1 \times 0.0221 \times 100}{756 \times 10^{-28}}\,\mathrm{m}^{-3} = 2.9233 \times 10^{24}\,\mathrm{m}^{-3}$$

联立上述式，得

$$C_{H_3BO_3} = 144.87\,\mathrm{mg/(kg水)}$$

在 1 kg 水中，物质的量 $n(H_3BO_3) = n(B)$，故有

$$\frac{C_B}{A_B} = \frac{C_{H_3BO_3}}{M_{H_3BO_3}}$$

解得

$$C_B = 52.524\,\mathrm{mg/(kg水)}$$

□

【题 2.9】 为什么裂变碎片一般都带有放射性?

解. 裂变碎片大都是一些不稳定的丰中子核素，通常需要经历 β 衰变才能稳定. □

【题 2.10】 一个典型的商用压水堆新堆中，若在一个短的时间间隔内发射出 10^5 个缓发中子，则在这同一时间内发射出的瞬发中子数大约为多少?

解. 在以 ^{235}U 作核燃料的热中子核反应堆中，缓发中子份额 $\beta = 0.0065$，故瞬发中子数为

$$n_0 = \frac{10^5}{\beta}\cdot(1-\beta) = \frac{10^5}{0.0065}\cdot(1-0.0065) = 1.528 \times 10^7$$

□

【题 2.11】 设某吸收剂的微观吸收截面 $\sigma_a(E)$ 服从 $1/v$ 定律，假定近似中子能谱可用 $1/E$ 谱描述，试求该吸收剂第 g 群 (E_{g-1}, E_g) 的平均微观吸收截面 σ_{ag}.

解. 由题意，$\sigma_a(E) \propto 1/v \propto 1/\sqrt{E}$, $n(E) \propto 1/E$，则 $\phi(E) \propto (1/E)\cdot\sqrt{E} = 1/\sqrt{E}$，于是

$$\sigma_{ag} = \frac{\int_{E_{g-1}}^{E_g}\sigma_a(E)\phi(E)\,\mathrm{d}E}{\int_{E_{g-1}}^{E_g}\phi(E)\,\mathrm{d}E} \propto \frac{\int_{E_{g-1}}^{E_g}E^{-1}\,\mathrm{d}E}{\int_{E_{g-1}}^{E_g}E^{-1/2}\,\mathrm{d}E} = \frac{\ln(E_g/E_{g-1})}{2\left(\sqrt{E_g}-\sqrt{E_{g-1}}\right)}$$

将 $\sigma_a(E) \propto 1/\sqrt{E}$, $\phi(E) \propto 1/\sqrt{E}$ 的比例系数全部归一为 C_σ，则

$$\sigma_{ag} = \frac{C_\sigma \ln(E_g/E_{g-1})}{2\left(\sqrt{E_g}-\sqrt{E_{g-1}}\right)}$$

□

Chapter 3

核反应堆中子学过程

习题

【题 3.1】 名词解释: 有效增殖系数, 慢化过程, 扩散过程, 中子流密度, 中子慢化长度, 中子扩散长度, 中子徙动长度, 中子慢化时间, 中子扩散时间, 中子平均寿命.

解.

(1) 有效增殖系数: 一个系统内新生一代的中子数与产生它们的直属上一代中子数之比, 即

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{新生一代中子数}}{\text{直属上一代中子数}} = \frac{\text{系统内中子产生率}}{\text{系统内中子总消失 (吸收 + 泄漏) 率}}$$

(2) 慢化过程: 中子能量不断减少, 直至变成热中子的过程.

(3) 扩散过程: 热中子在介质中位置不断变化的过程.

(4) 中子流密度: 沿着某一方向穿过单位面积的中子数, 用 $\vec{J}$ 表示.

(5) 中子慢化长度: 无限均匀介质中, 快中子从点源出发至慢化成热中子所穿行的直线距离方均值的 $\frac{1}{6}$.

(6) 中子扩散长度: 无限均匀介质中, 热中子从产生至被吸收时所穿行的直线距离方均值的 $\frac{1}{6}$.

(7) 中子徙动长度: 无限均匀介质中, 快中子从产生到被吸收时所穿行的直线距离方均值的 $\frac{1}{6}$.

(8) 中子慢化时间: 裂变中子从裂变能慢化到热中子分界能 E_{th} 所需的平均时间, 用 t_{s} 表示.

(9) 中子扩散时间: 热中子扩散至被吸收所需的平均时间, 用 t_{d} 表示.

(10) 中子平均寿命: 快中子自裂变慢化到热中子, 再扩散到被吸收所需的平均总时间, 用 l 表示, $l = t_{\text{s}} + t_{\text{d}}$.

□

【题 3.2】 某裂变堆, 快中子增殖因数 1.05, 逃脱共振吸收概率 0.9, 慢化不泄漏概率 0.952, 扩散不泄漏概率 0.94, 有效裂变中子数 1.335, 热中子利用系数 0.882, 试计算其无限介质增殖因数和有效增殖因数.

解. 由题意, $\varepsilon = 1.05$, $p = 0.9$, $P_{\text{s}} = 0.952$, $P_{\text{d}} = 0.94$, $\eta = 1.335$, $f = 0.882$, 则

$$k_{\infty} = \varepsilon p f \eta = 1.05 \times 0.9 \times 0.882 \times 1.335 = 1.1127$$
$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} P_{\text{s}} P_{\text{d}} = 1.1127 \times 0.952 \times 0.94 = 0.9957$$

□

【题 3.3】 某热中子核反应堆处于临界状态, 每次裂变产生中子数 $\nu = 2.43$, 已知该堆的中子泄漏损失占总中子数的 10%, 试求:

(1) 用于维持裂变反应的中子数占总中子数的百分比 R_{f};

(2) 除裂变以外, 被吸收的中子数占总中子数的百分比 R_{a};

解. 由题意, $k_{\text{eff}} = 1$, 系统内中子产生 = 系统内中子 (吸收 + 泄漏), 而中子泄漏损失数为 0.1ν, 则被吸收的中子数 0.9ν.

(1) 被吸收的中子中,用于维持裂变反应的中子数为 $\frac{\sigma_f}{\sigma_a} \times 0.9\nu = \frac{0.9\nu}{1+\alpha}$(取 $\alpha = 0.17$),于是

$$R_f = \frac{\frac{0.9\nu}{1+\alpha}}{\nu} = \frac{0.9}{1+\alpha} = \frac{0.9}{1+0.17} = 0.7692$$

(2) 除裂变以外,被吸收的中子数,即发生辐射俘获的中子数为 $\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_a} \times 0.9\nu = \frac{0.9\alpha\nu}{1+\alpha}$,于是

$$R_a = \frac{\frac{0.9\alpha\nu}{1+\alpha}}{\nu} = \frac{0.9\alpha}{1+\alpha} = \frac{0.9\times 0.17}{1+0.17} = 0.1308$$

□

【题 3.4】 核反应堆刚好临界时,$k_{\text{eff}} = 1$, $\Delta k/k = 0$.

【题 3.5】 反应性的单位有哪些?

解.

(1) $1\,\text{pcm} = 10^{-5}$;

(2) $1\,\text{mk} = 10^{-3}$;

(3) $1\,\$ = 1\,\beta = 0.0065$(不是固定值).

□

【题 3.6】 操作员从堆中将控制棒提出,使得核反应堆的有效增殖因子 k_{eff} 从 0.998 变为 1.002,此核反应堆处于 ( )

A. 瞬发临界 B. 超临界 C. 刚好临界 D. 次临界

【参考答案】B

【注】 瞬发临界是指 $\rho = \beta$,进一步,瞬发超临界是指 $\rho > \beta$.

【题 3.7】 在一个运行着的核反应堆堆芯中,一个热中子即将与一个铀-238 核相互作用.以下哪一种情形最有可能发生,并且将怎样影响堆芯的 k_{eff}? ( )

A. 该中子将被散射,使 k_{eff} 不变

B. 该中子将被吸收,铀-238 核将裂变,使 k_{eff} 减小

C. 该中子将被吸收,铀-238 核将裂变,使 k_{eff} 增大

D. 该中子将被吸收,铀-238 核将衰变,生成钚-239,使 k_{eff} 增大

【参考答案】A

解. 取热中子能量 $E_n = 0.0253\,\text{eV}$,查附录 3,得 ^{238}U 截面数据:$\sigma_s = 9.299832\,\text{b}$, $\sigma_\gamma = 2.682808\,\text{b}$, $\sigma_f = 1.679563\times 10^{-5}\,\text{b}$,显然有 $\sigma_s > \sigma_\gamma > \sigma_f$,即最有可能发生散射,则此时该热中子既不引发新的裂变产生新的中子,又不被吸收,也没有发生泄漏,故 k_{eff} 不变,选 A. □

【题 3.8】 为使铀的有效裂变中子数 $\eta = 1.7$,试采用 $E_n = 0.0253\,\text{eV}$ 时的截面估计铀中 ^{235}U 的质量富集度.

解. 对于 $E_n = 0.0253\,\text{eV}$ 的热中子,只有 ^{235}U 发生裂变,则有效裂变中子数

$$\eta = \frac{\nu\Sigma_{f5}}{\Sigma_{a5} + \Sigma_{a8}} = \frac{\nu N_5 \sigma_{f5}}{N_5\sigma_{a5} + N_8\sigma_{a8}}$$

可以得到

$$\frac{N_8}{N_5} = \frac{\nu\sigma_{f5} - \eta\sigma_{a5}}{\eta\sigma_{a8}}$$

进一步

$$c_5 = \frac{N_5}{N_5 + N_8} = \frac{1}{1 + \frac{N_8}{N_5}} = \frac{\eta\sigma_{a8}}{\nu\sigma_{f5} - \eta\sigma_{a5} + \eta\sigma_{a8}}$$

代入 $\eta = 1.7$,查附录 3,得 $\sigma_{a8} = 2.6828\,\text{b}$, $\sigma_{a5} = 683.5565\,\text{b}$, $\sigma_{f5} = 584.8925\,\text{b}$,取 $\nu = 2.43$,得 $c_5 = 0.0172885$. 故铀中 ^{235}U 的质量富集度

$$\varepsilon = \frac{235c_5}{235c_5 + 238(1-c_5)} = 0.01707 = 1.707\%$$

□

【题 3.9】 某核反应堆堆芯内的平均宏观裂变截面为 $5\,\mathrm{m}^{-1}$,平均功率密度为 $20\,\mathrm{MW/m^3}$;假设每次裂变释放出的能量为 200 MeV,试求堆芯内的平均中子注量率.

解. 由题意,$\Sigma_\mathrm{f}=5\,\mathrm{m}^{-1}$, $P_V=20\,\mathrm{MW/m^3}=2\times10^7\,\mathrm{J/(m^3\cdot s)}$, $E_0=200\,\mathrm{MeV}=3.2\times10^{-11}\,\mathrm{J}$. 由 $P_V=\Sigma_\mathrm{f}\overline{\phi}E_0$,得

$$\overline{\phi}=\frac{P_V}{\Sigma_\mathrm{f}E_0}=\frac{2\times10^7}{5\times3.2\times10^{-11}}\,\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}}=1.25\times10^{17}\,\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}}$$

□

【题 3.10】 H 和 O 在 1000 eV 到 1 eV 能量范围内的散射截面近似为常数,分别为 20 b 和 38 b. 计算 H_2O 的平均对数能降增量以及中子在 H_2O 中从 1000 eV 慢化到 1 eV 所需的平均碰撞次数.

解. 平均对数能降增量

$$\xi=1-\frac{(A-1)^2}{2A}\ln\left(\frac{A+1}{A-1}\right)$$

于是有 $\xi_\mathrm{H}=1$, $\xi_\mathrm{O}=0.1199$. 轻水的慢化能力来自氢核,氧核两方面的贡献,即

$$\begin{aligned}&\xi_{\mathrm{H_2O}}\Sigma_{s,H_2O}=\xi_\mathrm{H}\Sigma_{s,H}+\xi_\mathrm{O}\Sigma_{s,O}\\ \Rightarrow&\xi_{\mathrm{H_2O}}(N_\mathrm{H}\sigma_\mathrm{H}+N_\mathrm{O}\sigma_\mathrm{O})=\xi_\mathrm{H}N_\mathrm{H}\sigma_\mathrm{H}+\xi_\mathrm{O}N_\mathrm{O}\sigma_\mathrm{O}\end{aligned}$$

$N_\mathrm{H}=2N_\mathrm{O}$,两边同除以 N_O,得

$$\xi_{\mathrm{H_2O}}(2\sigma_\mathrm{H}+\sigma_\mathrm{O})=2\xi_\mathrm{H}\sigma_\mathrm{H}+\xi_\mathrm{O}\sigma_\mathrm{O}$$

即

$$\xi_{\mathrm{H_2O}}=\frac{2\xi_\mathrm{H}\sigma_\mathrm{H}+\xi_\mathrm{O}\sigma_\mathrm{O}}{2\sigma_\mathrm{H}+\sigma_\mathrm{O}}=\frac{2\times1\times20+0.1199\times38}{2\times20+38}=0.5712$$

平均碰撞次数

$$N_{\mathrm{c},\mathrm{H_2O}}=\frac{\ln\frac{E_1}{E_2}}{\xi_{\mathrm{H_2O}}}=\frac{\ln\frac{1000}{1}}{0.5712}=12.09$$

□