

上册



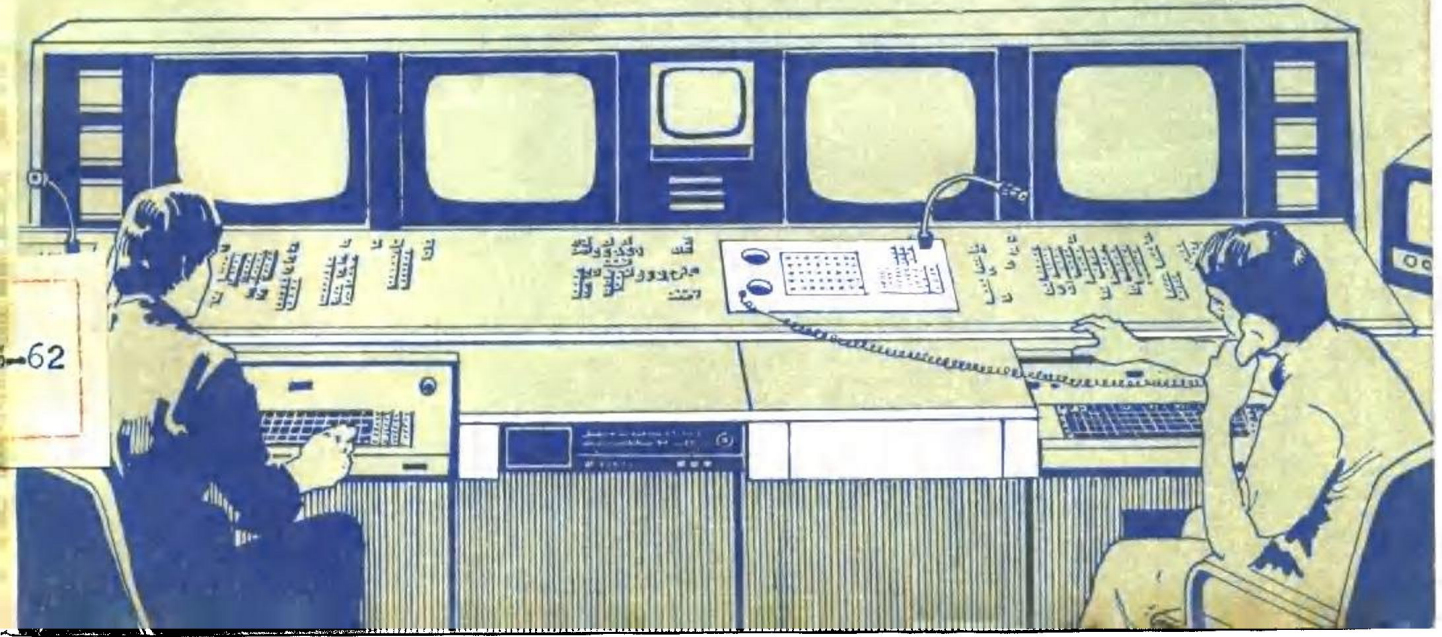
核动力反应

[美] J. M. 哈勒 著
J. G. 贝克利

堆仪表和控

制系统手册

原子能出版社



内 容 简 介

本手册分上、下两册。上册共有十一章。除第一章介绍动力反应堆测量和控制动力学的基本知识外，第二至第七章按系统详细叙述了现代反应堆所使用的各类仪器仪表和控制系统，仪表的性能、设计、安装、使用的要求和经验，以及选用的设备、材料和附件。第八章详述了选用计算机的方案和要求。第九章为选用电源系统做了详细的方案比较。第十章介绍了仪表系统施工安装的知识、要求和经验。第十一章对仪器仪表系统的质量保证和可靠性作了详细的分析。

本手册中，还附有不少操作规程、程序编制和检验规程的实例，它们提供了具体经验。

本手册可供从事反应堆和核电站仪器仪表研究、设计、制造、安装、操作和维护人员使用，也可供大专院校有关专业的师生参考。

Nuclear Power Reactor Instrumentation Systems Handbook

J. M. Harrer J. G. Beckerley

The Office of Information Services U. S. Atomic
Energy Commission, 1973

核动力反应堆仪表和控制系统手册

(上册)

[美] J. M. 哈勒 J. G. 贝克利 著
郑福裕 罗征培 罗经宇 译
陈叔平 龚云峰 叶奇蓁 校

原子能出版社出版
(北京 2108 信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 24 3/4 · 字数 588 千字

1983年1月第一版·1983年1月第一次印刷

印数 001—1500 · 统一书号: 15175·420

定价: 3.05元

前 言

核动力工程已经发展到了这样的阶段：反应堆的设计和建造的许多方面，已经有了公认的实践经验。特定类型反应堆中所使用的仪器仪表间的共性多于差异。变革是逐步的，并且是演变的。今天公认的实践经验，将作为有益的经验而沿用一些年。但这并不意味着在核动力技术方面将来不会有较大的变革，而仅仅意味着变革的速度将不会快到今天学到的东西明天就得丢掉的程度。

本书描述了今天的动力反应堆（包括正在设计中的反应堆）的仪表和控制系统，介绍了动力反应堆仪表和控制系统主要部件的性能和特性；而对于部件的设计，只作了极少的介绍。例如，在有关核辐射敏感元件的几章中，详细地描述了敏感元件的结构和性能，但却未提供核辐射敏感元件设计者所需要的数据。这与强调动力反应堆仪表和控制系统方面的基本意图是一致的。

本书的读者对象是动力反应堆仪器仪表的设计人员和运行人员（即与仪表的使用有关的人员），而不是仪器仪表的发明者、革新者。书中讨论了系统的各个方面，包括将个别元件组成子系统和系统的问题，即所谓的“接口”问题，列出了每一系统或子系统应满足的要求（即设计依据），略述了现有的实践经验，并对其作了评价。

正如书题所示，本书考虑了与核动力反应堆有关的仪表和控制系统，而与发电和发电机运行有关的系统并不包括在内。虽然本书所讨论的某些仪表和控制系统的内容中确实涉及到了蒸汽驱动透平发电机的部分，但在某种意义上，本书内容只与核反应堆产生蒸汽的部分有关。

本书共十八章，分为上、下两册。上册的第一章概述了基本定义，反应堆动力学及反应堆类型的导论。第二、三、四章与敏感元件有关。第五章是与中子探测器有关的电子学。第六章介绍测定核反应堆动态特性的系统。由于控制棒驱动机构和控制棒位置指示器与核动力反应堆的运行具有独特的关系，且与保护系统的中子和位置敏感元件紧密地耦合在一起，所以这些内容在第七章中作了扼要的叙述。

以后的四章都是涉及与整个反应堆系统有关的课题：第八章描述了在核动力反应堆数据处理和过程控制方面计算机应用的日益发展的情况；讨论了核电站中核辐射和放射性物质的监测系统。仪器仪表的运行是离不开电源的，所以第九章专讲这个题目。有许多问题是仪器仪表部件安装不妥引起的，所以第十章专讲安装问题。第十一章提供了反应堆仪表和控制系统设计者和使用者所需要的有关质量保证和可靠性方面的基本资料。

下册的内容是上册所提供的资料的应用。

由于反应堆保护系统十分重要，因而第十二章专门介绍安全保护系统的设计依据和现代的设计。第十三章描述辐射监测。

第十四章介绍有关反应堆仪表和控制系统的标准和规范状况。第十五、十六、十七、十八章扼要介绍了压水堆、沸水堆、钠冷堆、气冷堆四种主要堆型在仪表和控制系统方面当前的技术发展水平。

下册中附有附录：现代动力反应堆堆芯仪表摘要。

目 录

第一章	基本知识	1
第二章	堆芯外的核辐射敏感元件	28
第三章	堆芯内的中子敏感元件	52
第四章	过程检测仪表	72
第五章	中子通量信号调节	141
第六章	传递函数测量系统	174
第七章	控制棒驱动机构及指示系统	211
第八章	过程计算机的应用和数据处理	240
第九章	电源	272
第十章	仪表和控制系统的安装	290
第十一章	质量保证和可靠性	335

第一章 基本知识

Joseph M. Harrer James G. Beckerley

本章目录

1-1 核燃料和化石燃料	1
1-2 定义	2
1-2.1 术语	2
1-2.2 裂变过程术语	4
1-2.3 核反应堆术语	4
1-3 核反应堆动力学	6
1-3.1 无缓发中子的点动力学	6
1-3.2 有缓发中子的点动力学	6
1-3.3 反应性	9
1-3.4 倒时方程	10
1-3.5 反应性引入的效应	12
1-3.6 反应性的变化	14
(a) 氙-135	15
(b) 钐-149	19
(c) 燃耗	22
1-3.7 三维动力学	23
1-4 核电站	24
1-4.1 核电站的类型	24
1-4.2 自动检测的变量	24
参考文献	27

1-1 核燃料和化石燃料

为了对运行的核电站的核过程和化学过程进行监测、控制和调节，需要有很多的仪表和控制系统。虽然其中有些系统与化石燃料电厂中所用的相同，但有很多系统却是完全不一样的。

常规（化石燃料）火电厂和核电站的仪器仪表系统之间存在差别的最重要的原因，多半是火电厂用连续添加燃料的方式运行，而核电站则是用储存的燃料来运行。在火电厂中，燃料是连续地添加入燃烧室，而在目前的核电站中，反应堆内总是装有可供运行好几个月全部核燃料。因为燃料装载量很大，所以由设备损坏或误操作引起的核反应率的增加，并不会

因燃料的烧光而终止。也许在未来的核电站（例如用液态燃料的核电站）中，反应区中的燃料装载量可以减少，从而减小相应的危险。同时，为了防止设备损坏，核电站的仪器仪表必须工作可靠。

核电站和常规火电厂的仪器仪表有所不同的另一个原因是两类燃料的热值不同。一磅纯核燃料裂变时约释放出 400 亿英热单位的热量，而一磅煤燃烧时只能放出 14000 英热单位的热量。可见核燃料是如此之强的热源，因此来自核燃料的热通量可能超过冷却剂的载热能力。因而，必须测量核燃料性状的详细情况。在核动力工程中，对监测燃料性状的仪器仪表系统的研制作了较大的努力。

核燃料的热能几乎完全来自裂变碎片。当碎片形成时，它们具有相当于温度为 10^{12} °C 左右的粒子的动能。在当前采用的固体燃料中，裂变碎片的能量立即分配给周围的密度大约为 10^{22} 原子/厘米³ 的燃料（一般是金属铀、氧化铀或碳化铀），而核燃料的平均温度比初始裂变碎片温度要低好几个量级。事实上，要调节冷却剂流量，使核燃料内部温度保持在与典型的化石燃料燃烧温度同一范围（约摄氏几千度）内。然而，如果冷却剂流受到阻碍，核燃料温度就会升得很高。核动力堆仪器仪表的主要任务之一就是防止出现这种情况。

在核电站和常规火电厂之间还有另一个差别，即在核反应堆的某些区域有很强的核辐射场，这对仪器仪表有影响。这个场同敏感元件及电气元件的相互作用，会使信号失真和系统性能退化。因此，核电站的仪器仪表所用的材料和工艺常常与化石燃料火电厂所用的不同。

1-2 定 义

核电站这一术语是以要求仔细定义的概念为基础的。在随后几章中，每当讨论新的内容时，总会出现很多专门术语的定义。本节列出对了解核电站运行所必需的若干基本术语的定义。这些定义的次序是按照概念而不是按照字母顺序排列的。大多数的定义都是全文引自“美国国家标准核科学和工艺学术语汇编”^[1]。

1-2.1 术语

核素 用质量数（核内的中子数加质子数）、原子序数（中性原子的电子数）以及核的能态（只要处于此状态的平均寿命长得能够观测到）来表征的原子。

中子 一种基本粒子，呈中性，其质量与氢原子近似相等。在自由态下，它衰变成一个质子和一个电子，半衰期约为 11.7 分。

热中子 与其所在的介质基本上处于热平衡的中子。

快中子 动能大于某个特定值的中子。在反应堆物理中，该值常常选为 0.1 兆电子伏。

β 粒子 原子核或中子转变过程中发射出的电子，它或带正电 (β^+)，或带负电 (β^-)。

放射性衰变 一种自发的核转变，在该过程中原子核发射出粒子或 γ 辐射，或者发生自发裂变；或者在该过程中原子俘获轨道电子即内转换之后发射出 X 射线或俄歇电子。

衰变常数(或蜕变常数) 单位时间内放射性核素（辐射核）的一个核子发生自发放射性衰变的几率，以公式表示为

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$$

其中 N 是时间 t 内存在的有关核的数目。

居里 放射性强度（核衰变率）的一个专用单位。1居里等于每秒 3.7×10^{10} 次衰变。“居里”简写为 Ci^①。

半衰期（放射性半衰期） 对一个简单的放射性衰变过程来说，放射性强度（ dN/dt 或 λN ）由于该过程而减弱一半所需要的时间。半衰期与衰变常数的关系是 $T_{1/2} = (\log e^2)/\lambda = 0.69315/\lambda$ 。

截面 在入射辐射与靶核粒子或粒子系统之间发生某种特定相互作用的几率的一种度量。它等于每个靶核粒子发生这种特定过程的反应率除以入射辐射的粒子通量密度（微观截面）。在反应堆物理中，有时把这个术语应用于一种特定靶核粒子群，例如单位体积内的粒子群（宏观截面），或单位质量内的粒子群，或特定物体中的粒子群。（注：除非另有说明，否则“截面”均指“微观截面”。）

宏观截面 在某给定材料的单位体积内对某一特定过程的截面。它的量纲为长度的倒数。对于纯核素，它等于微观截面与单位体积内靶核数的乘积；对于核素的混合物，它是这类乘积之总和。

微观截面 每个靶核、原子或分子的截面。它的量纲为面积，可以把它看作是在垂直于入射粒子的方向上、靶核与入射粒子能起作用的那部分几何面积。微观截面通常用“靶”表示，1靶 = 10^{-24} 厘米²。

粒子通量密度 在空间给定点，单位时间内入射到以该点为中心的小球上的粒子或光子数除以该球的断面积。它等于粒子密度与粒子平均速度的乘积，此术语通常称作通量。

中子通量密度 中子的粒子通量密度。通常也称为中子通量，常用 $n v$ 或 ϕ 表示。

粒子积分通量 在空间给定点，于给定时间间隔内入射到以该点为中心的小球上的粒子或光子数除以该球的断面积。它等于粒子通量密度的时间积分，常用 $n v t$ 表示。

粒子密度 在空间给定点，以该点为中心的小球内单位体积中的粒子或光子数。

电离辐射 与物质互相作用后能直接或间接地产生离子的任何电磁辐射或微粒辐射。

间接电离粒子 能直接释放电离粒子或能够触发核转变的不带电粒子或光子。

直接电离粒子 具有足够的动能，能由碰撞产生电离的带电粒子。

照射量 X 射线或 γ 射线在空气中产生的电离的度量。当在体积元空气中由光子所释放的所有电子被完全阻留在空气中时，所产生的一种符号的离子电荷的总和除以该体积元的空气质量所得的商。照射量的专用单位是伦琴（R）。

伦琴 照射量的专用单位。1R = 2.58×10^{-4} 库伦/千克（空气）。

剂量 一个通用的术语，指在规定物体内部吸收的辐射的量或能量。当专用时，它的含意应该适当加以说明，例如吸收剂量。

吸收剂量 电离辐射授与体积元中物质的能量除以该体积元中受照射材料的质量所得的商。吸收剂量的专用单位是拉德（rad）（吸收剂量常称为剂量）。

拉德 吸收剂量的专用单位。1拉德 = 100 尔格/克。

剂量当量（辐射防护专用） 吸收剂量、线质系数、剂量分布因子和其他修正因子的乘积。为了用共同的尺度来表示所有电离辐射对受照射个体的影响，必须引入其他修正因子。剂量当量的专用单位是雷姆（rem）。

① 1居里 = 3.7×10^{10} 贝可。——译者注

雷姆 用雷姆表示的剂量当量在数值上等于用拉德表示的吸收剂量与线质系数、分布因子和任何其他必要的修正因子的乘积。

线质系数 (辐射防护专用) 与线能量传递有关的系数, 它乘以吸收剂量就得到剂量当量。[注意: 只有在放射生物学领域中才用“相对生物效应 (RBE)”]

线能量传递 (LET) 特定能量的带电粒子所穿过的单位距离内就地授与介质的平均能量。[注意: (1) 术语“就地授与”既可以指离开径迹的最大距离, 也可以指粒子不连续能量损失的最大值, 超过该值就不再认为损失是就地的了。对任何一种情况, 都应该说明所选定的限制; (2) LET 的概念与阻止本领的概念是不同的。前者指在限定体积内所接受的能量, 后者则指粒子所损失的能量, 而不管这个能量是在哪里被吸收的。]

剂量分布因子 (辐射防护专用) 考虑到体内沉积的放射性核素的非均匀分布, 在计算剂量当量时需用的因子。

最大容许剂量当量 (MPD) (辐射防护专用) 由制定规章的机构或其他有权威的团体认可的, 在规定时间内容许接受的最大剂量当量限值。它基于下列假定: 接受这么多的剂量当量不会产生明显的躯体效应或遗传效应。在同一人群中, 不同组的人群可以有不同的 MPD 值。(按通常习惯, “最大容许剂量”是通用的同义词。)

比释动能 (在物质中释放的动能) 在体积元中被间接电离粒子所释放的所有带电粒子的初始动能的总和与此体积元内物质质量的比值。

1-2.2 裂变过程术语

核裂变 重核分裂成质量为同一量级的两个部分 (偶尔也有两个以上的), 通常伴随着发射中子、 γ 射线, 偶尔还有小的带电的核碎片。

快裂变 由快中子引起的裂变。

热裂变 由热中子引起的裂变。

自发裂变 没有外加粒子或能量的情况下原子核发生的裂变。

可裂变物质 能由任何一过程引起裂变的核素。

易裂变物质 能与慢中子相互作用而发生裂变的核素。(在反应堆物理中, 常常将动能小于 1 电子伏的中子定义为慢中子。)

可转变物质 俘获中子后能直接或间接转变成易裂变核素的一种核素。在一种材料中, 包含一种或多种可转变的核素。

裂变碎片 由裂变生成, 并由该裂变取得动能的核。

裂变产物 裂变生成的核素, 或是由裂变形成的核素经逐级放射性衰变后生成的核素。

裂变产额 产生给定类型裂变产物的裂变份额。

瞬发 γ 辐射 测不出延迟的, 伴随裂变过程放出的 γ 射线。

瞬发中子 测不出延迟的, 伴随裂变过程放出的中子。

缓发中子 在 β 衰变过程中形成的激发态核发射出的中子。(中子发射本身是瞬发的, 因此观测到的延迟是先前的一次或多次 β 发射的延迟。)

1-2.3 核反应堆术语

核链式反应 指这样一串核反应, 其中发生这一串事件必需的动因之一是由反应本身所产生的, 且其目的又是产生同样的反应。反应可以是收敛的 (次临界)、自持的 (临界) 或发散的 (超临界), 这要视一次反应直接造成的反应数平均说来是小于 1, 等于 1 或大于 1

而定。

核反应堆 能维持与控制自持核裂变链式反应的一种装置(裂变反应堆)，通常叫作“反应堆”或“堆”。

快反应堆 主要由快中子引起裂变的反应堆(也称为快中子反应堆)。

热反应堆 主要由热中子引起裂变的反应堆(也称为热中子反应堆)。

倍增系数 在给定时间间隔内产生的中子总数(其强度不是裂变率函数的源所产生的中子除外)与同一时间间隔内由于吸收和泄漏而损失的中子总数之比。对无限大介质或无限重复的栅格估算这个量时，称它为**无限倍增系数**(k_{∞})。对有限介质估算这个量时，称它为**有效倍增系数**(k_{eff}) (倍增系数也可称为**倍增常数**)。

临界 需满足这样的条件：能维持核链式反应的介质的有效倍增系数等于1。除了其强度不是裂变率函数的中子源产生的中子外，当中子产生率等于中子损失率时，核反应堆是临界的。

缓发临界 与临界意义相同，而本术语用来强调缓发中子对达到临界状态是必需的。

瞬发临界 需满足这样的条件：核链式反应介质只利用瞬发中子就达到了临界。

瞬发中子份额 每次裂变瞬发中子的平均数与每次裂变平均的(瞬发加缓发)中子总数之比。

缓发中子份额 每次裂变的缓发中子的平均数与每次裂变平均的(瞬发加缓发)中子总数之比。

有效缓发中子份额 缓发中子引起的平均裂变数与缓发中子加瞬发中子引起的平均总裂变数之比。[注意：有效缓发中子份额一般大于实际的缓发中子份额。]

反应性 参数之一(ρ)，它表示核链式反应介质与临界状态的偏离。当它为正值时，相应为超临界状态；当它为负值时，则为次临界状态。 $\rho = 1 - (1/k_{eff})$ ，式中 k_{eff} 是有效倍增系数。

过剩反应性 任何时刻靠调节控制元件可达到的最大反应性。

固有反应性 系统的反应性，它随设计要求而有所不同，系统的实验插入和控制插入不计在内。

反应堆控制 有意识地改变反应堆内的反应率，或为了维持所需的运行状态而调节反应性。

反应性系数 反应堆内插入小量物质引起的反应性变化。此物质的反应性系数可能与插入物质的数量和位置有关，而通常把它视为反应堆内特定位置插入单位质量物质引起的反应性变化，或视为均匀分布引起的反应性变化。

空穴系数 在反应堆内特定位置反应性对空穴(即移去材料)的偏导数。它等于移去材料后的反应性系数。

反应性等温温度系数 在具有均匀温度的零功率反应堆内，温度增加1度所引起的反应性变化。

反应性功率系数 当其它变量并不独立变化时，反应堆改变单位热功率引起的反应性变化。

1-3 核反应堆动力学

设计核电站仪表和控制系统必须考虑到那个电站的反应堆的特殊性。特别重要的是反应堆动力学特性。近年来发表了很多论述核反应堆动力学的教科书和论文，详细内容读者可参阅参考文献[2—6]。下面的章节摘录了与核动力堆仪表和控制系统特别有关的基本材料。

1-3.1 无缓发中子的点动力学

用符号 n (中子/厘米³) 表示核裂变链式反应堆内给定位置的中子密度。如果反应堆刚好临界，则有效倍增系数 k 恰好等于 1，从而中子密度 n 是常数。如果有效倍增系数增加了 $\delta k = k - 1$ ($\delta k > 0$)，那么 n 将随时间而增加。

n 的增加率 dn/dt 等于下一代增加的中子数 $n\delta k$ 除以两代之间的时间 l ，

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n\delta k}{l} = \frac{n(k-1)}{l} \quad (1.1)$$

积分后得

$$n = n_0 e^{(\delta k/l)t} \quad (1.2)$$

其中 n_0 指 $t=0$ 时的中子密度。指数上第一个因子 $\delta k/l$ 的倒数有时间的量纲，它通常称为反应堆周期

$$\left. \begin{aligned} n &= n_0 e^{t/T} \\ T &= l/\delta k \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

这些方程式是根据下列假设推导出来的：在核裂变链式反应中，各代之间只有一个特征时间。这与只有瞬发中子参与链式反应的假设是相同的。

1-3.2 有缓发中子的点动力学

在参与链式反应的中子里，有一些是在裂变事件发生后不同时间发射出来的。当某些裂变产物核素发生发射 β 粒子的衰变时，它的产物核素是不稳定的，每个核素在 β 衰变之后立即发射出一个中子。因此这些中子的发射率与这些“先驱”核素的 β 衰变率相同，即随时间指数衰减。

表 1.1 和 1.2 分别列出 ²³³U、²³⁵U 和 ²³⁹Pu 由热中子裂变和快中子裂变生成的缓发中子发射体的半衰期和衰变常数 ($\lambda = \ln 2/T_{1/2} = 0.693/T_{1/2}$)。表中也列出了缓发中子的绝对产额 (每次裂变后每种先驱核发射出的缓发中子数) 和缓发中子的相对丰度 (每种先驱核发射出的缓发中子数除以裂变过程中发射出的缓发中子总数)。

为了引入缓发中子对核链式反应的影响，可将有效倍增系数看成是两项之和。

$$k = (\text{瞬发中子的倍增系数}) + (\text{缓发中子的倍增系数}) = k(1-\beta) + k\beta \quad (1.4)$$

其中 β 是缓发中子份额，即每次裂变的缓发中子数除以每次裂变的瞬发中子加缓发中子的总数。缓发中子份额可以表示为各组缓发中子发射体的缓发中子份额之和，即

$$\beta = \sum_{i=1}^m \beta_i \quad (1.5)$$

其中 m 是缓发中子组数。表 1.3 列出了热中子和快中子引起的 ²³³U、²³⁵U 和 ²³⁹Pu 裂变的 β_i 值。表中也列出了每次裂变发射出的瞬发中子数 ν 。用表 1.3 中的 β 值乘以表 1.1 和 1.2 中

的相对丰度就得到了 β_i 值。

缓发中子的平均能量与瞬发中子的平均能量是不相同的。因此在任何链式反应系统内，对增殖核裂变链式反应来说，缓发中子的效率与瞬发中子的也有所不同。方程 (1.4) 中所用的因子 β 没有考虑到这一点，因为 β 是简单的两项中子数之比。考虑到中子能量，用 $\nu\beta$ 来代替 β

$$\begin{aligned} \nu\beta &= \text{有效缓发中子份额} \\ &= (\text{缓发中子引起的裂变数}) / (\text{缓发中子加瞬发中子引起的裂变数}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

其中 ν 是缓发中子的效率。 ν 值取决于链式反应系统，一般稍大于 1。对本书所讨论的那些动力堆来说，假设 $\nu=1$ 是良好的近似。同样，各个缓发中子组的缓发中子效率也可以假定是 1，即 $\nu=\nu_i=1$ 。

将中子密度 (n =中子/厘米³) 的变化率写成两项之和，就得到了考虑缓发中子的核裂变链式反应的基本动力学方程：

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= (\text{瞬发中子密度的变化率}) + (\text{缓发中子密度的变化率}) \\ &= \frac{n}{l} [k(1-\beta) - 1] + \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i \end{aligned} \quad (1.7)$$

其中 C_i 是第 i 组缓发中子发射体的密度 (数目/厘米³)， λ_i 是第 i 组缓发中子发射体的衰变常数 (衰变份额/秒)。组数 m 是 6 (见表 1.1 和 1.2)。用瞬发中子的倍增系数 [方程 (1.4)] 代替方程 (1.1) 中的 k ，就得到了方程 (1.7) 的第一项。

表 1.1 热中子裂变中缓发中子的半衰期和产额^[7]

核素	缓发中子/裂变	组号 (i)	半衰期 ($T_{1/2}$), 秒	衰变常数 [●] (λ), 秒 ⁻¹	相对丰度 (a)	绝对产额, %
²³⁵ U	0.0066±0.0003	1	55.00±0.54	0.0126±0.0002	0.086±0.003	0.057±0.003
		2	20.57±0.38	0.0337±0.0006	0.299±0.004	0.197±0.009
		3	5.00±0.21	0.139±0.006	0.252±0.040	0.166±0.027
		4	2.13±0.20	0.325±0.030	0.278±0.020	0.184±0.016
		5	0.615±0.242	1.13±0.40	0.051±0.024	0.034±0.016
		6	0.277±0.047	2.50±0.42	0.034±0.014	0.022±0.009
²³⁵ U	0.0158±0.0005	1	55.72±1.28	0.0124±0.0003	0.033±0.003	0.052±0.005
		2	22.72±0.71	0.0305±0.0010	0.219±0.009	0.346±0.018
		3	6.22±0.23	0.111±0.004	0.196±0.022	0.310±0.036
		4	2.30±0.09	0.301±0.012	0.395±0.011	0.624±0.026
		5	0.61±0.083	1.13±0.15	0.115±0.009	0.182±0.015
		6	0.23±0.025	3.00±0.33	0.042±0.008	0.066±0.008
²³⁹ Pu	0.0061±0.0003	1	54.28±2.34	0.0128±0.0005	0.035±0.009	0.021±0.006
		2	23.04±1.67	0.0301±0.0022	0.298±0.035	0.182±0.023
		3	5.60±0.40	0.124±0.009	0.211±0.048	0.129±0.030
		4	2.13±0.24	0.325±0.036	0.326±0.033	0.199±0.022
		5	0.618±0.213	1.12±0.39	0.086±0.029	0.052±0.018
		6	0.257±0.045	2.69±0.47	0.044±0.016	0.027±0.010

● 衰变常数与半衰期的关系为 $\lambda = (\ln 2) / T_{1/2} = 0.693 / T_{1/2}$ 。

表 1.2 快裂变中缓发中子的半衰期和产额^①

核素	缓发中子/裂变	组号 (i)	半衰期 ($T_{1/2}$), 秒	衰变常数 (λ), 秒 ⁻¹	相对丰度 (a)	绝对产额, %
²³³ U	0.0070±0.0004	1	55.11±1.86	0.0126±0.0004	0.086±0.003	0.06±0.003
		2	20.74±0.86	0.0334±0.0014	0.274±0.005	0.192±0.009
		3	5.30±0.19	0.131±0.005	0.227±0.035	0.159±0.025
		4	2.29±0.18	0.302±0.024	0.317±0.011	0.222±0.012
		5	0.546±0.108	1.27±0.266	0.073±0.014	0.051±0.010
		6	0.221±0.042	3.13±0.675	0.023±0.007	0.016±0.005
²³⁵ U	0.0165±0.0005	1	54.51±0.94	0.0127±0.0002	0.038±0.003	0.063±0.005
		2	21.84±0.54	0.0317±0.0008	0.213±0.005	0.351±0.011
		3	6.00±0.17	0.115±0.003	0.188±0.016	0.310±0.028
		4	2.23±0.06	0.311±0.008	0.407±0.007	0.672±0.023
		5	0.496±0.029	1.40±0.081	0.128±0.008	0.211±0.015
		6	0.179±0.017	3.87±0.369	0.026±0.003	0.043±0.005
²³⁸ U	0.0412±0.0017	1	52.38±1.29	0.0132±0.0003	0.013±0.001	0.054±0.005
		2	21.58±0.39	0.0321±0.0006	0.137±0.002	0.564±0.025
		3	5.00±0.19	0.139±0.005	0.162±0.020	0.667±0.087
		4	1.93±0.07	0.358±0.014	0.388±0.012	1.599±0.081
		5	0.49±0.023	1.41±0.067	0.225±0.013	0.927±0.060
		6	0.172±0.009	4.02±0.214	0.075±0.005	0.309±0.024
²³⁹ Pu	0.0063±0.0003	1	53.75±0.95	0.0129±0.0002	0.038±0.003	0.024±0.002
		2	22.29±0.36	0.0311±0.0005	0.280±0.004	0.176±0.009
		3	5.19±0.12	0.134±0.003	0.216±0.018	0.136±0.013
		4	2.09±0.08	0.331±0.012	0.328±0.010	0.207±0.012
		5	0.549±0.049	1.26±0.115	0.103±0.009	0.065±0.007
		6	0.216±0.017	3.21±0.255	0.035±0.005	0.022±0.003
²⁴⁰ Pu	0.0088±0.0006	1	53.56±1.21	0.0129±0.0004	0.028±0.003	0.022±0.003
		2	22.14±0.38	0.0313±0.0005	0.273±0.004	0.238±0.016
		3	5.14±0.42	0.135±0.011	0.192±0.053	0.162±0.044
		4	2.08±0.19	0.333±0.031	0.350±0.020	0.315±0.027
		5	0.511±0.077	1.36±0.205	0.128±0.018	0.119±0.018
		6	0.172±0.033	4.04±0.782	0.029±0.006	0.024±0.005
²³² Th	0.0496±0.0020	1	56.03±0.95	0.0124±0.0002	0.034±0.002	0.169±0.012
		2	20.75±0.66	0.0334±0.0011	0.150±0.005	0.744±0.037
		3	5.74±0.24	0.121±0.005	0.155±0.021	0.769±0.108
		4	2.16±0.08	0.321±0.011	0.446±0.015	2.212±0.110
		5	0.571±0.042	1.21±0.090	0.172±0.013	0.853±0.073
		6	0.211±0.019	3.29±0.297	0.043±0.006	0.213±0.031

● “快裂变”的定义为由类似于瞬发裂变中子谱的连续中子谱所引起的裂变。

表 1.3 缓发中子的份额和产额

裂变核素	快裂变 ($E_{eff} \sim$ 裂变谱)			热中子引起的裂变		
	n/F	ν	β	n/F	ν	β
^{239}Pu	0.0063 ± 0.0003	3.08 ± 0.04	$0.0020_4 \pm 0.0001_1$	0.0061 ± 0.0003	$2.82_6 \pm 0.02_1$	$0.0021_6 \pm 0.0001_1$
^{235}U	0.0070 ± 0.0004	2.61 ± 0.03	$0.0026_8 \pm 0.0001_6$	0.0066 ± 0.0003	$2.46_9 \pm 0.02_0$	$0.0026_7 \pm 0.0001_2$
^{240}Pu	0.0088 ± 0.0006	3.3 ± 0.2	$0.0026_8 \pm 0.0002_4$			
^{241}Pu				0.0154 ± 0.0015	3.14 ± 0.06	0.0049 ± 0.0005
^{238}U	0.0165 ± 0.0005	2.59 ± 0.03	$0.0063_7 \pm 0.0002_2$	0.0158 ± 0.0005	$2.43_0 \pm 0.001$	$0.0065_0 \pm 0.0002_1$
^{238}U	0.0412 ± 0.001	2.80 ± 0.13	0.0147 ± 0.0009			
^{232}Th	0.0496 ± 0.0020	2.42 ± 0.20	0.0205 ± 0.0019			

- ① 引自 H.C. Paxton and G. R. Keepin, *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, Vol.1, p.267, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1964.
- ② n/F ——每次裂变放出的缓发中子数; ν ——每次裂变放出的平均中子总数; $\beta = n/F\nu$ ——总缓发中子份额。

各缓发中子发射体的密度 C_i 可由下列方程求得:

$$\begin{aligned} \frac{dC_i}{dt} &= (\text{第 } i \text{ 组缓发中子发射体的产生率}) - (\text{第 } i \text{ 组缓发中子发射体的衰变率}) \\ &= \frac{k\beta_i n}{\lambda_i} - \lambda_i C_i \end{aligned} \quad (1.8)$$

第一项是缓发中子倍增系数 (方程 1.4) 除以两代之间的时间间隔 (即瞬发中子寿命) λ_i 。如果除了可裂变同位素和发射中子的裂变产物之外, 还有中子源存在, 那么必须在方程式 (1.8) 右端加上源项。

方程 (1.7) 和 (1.8) 是基本的中子动力学方程。在核动力反应堆仪器仪表和控制系统的的设计中, 它们是很重要的。在第六章中将用这些方程来说明为什么测定传递函数能够获得动力反应堆性状的有用知识。在第七章内将表明这些方程是反应堆控制系统设计的基础。

1-3.3 反应性

当核电站以稳定的即不变的速率生产电能时, 反应堆处于稳态, 此时中子密度为一定值, 堆内各处的温度也不变。方程 (1.7) 和 (1.8) 表明: 由于在这种稳态下 $dn/dt = dC_i/dt = 0$, 有效倍增系数刚好是 1。如果有效倍增系数增加到 1 以上, 则 n 将随时间而增大。类似地, 当 $k < 1$ 时, n 随时间而减小。

如果 k 加大到 1 以上, 达到使方程 (1.7) 的第一项变成零的一个值; 那么当 k 比该值大时, 这一项就变成正值了。当 $k(1-\beta) - 1$ 是正值时, 中子密度随时间增长的速率取决于 $k(1-\beta) - 1$ 与瞬发中子寿命 λ 的比值。在这些情况下, 反应堆是瞬发临界的, 且因为 λ 很小 (对热堆 $\lambda \approx 10^{-4}$ 秒, 对快堆 $\lambda \approx 10^{-7}$ 秒), 所以对任何一个可觉察到的 $k(1-\beta) - 1$ 的正值, n 都随时间而非常迅速地增长。当反应堆刚好瞬发临界时, 有效倍增系数的值是 $1/(1-\beta)$ 。因为动力反应堆总是要保持低于瞬发临界, 所以堆在运行时的有效倍增系数的实际范围在 1 和 $1/(1-\beta)$ 之间, 而当堆起动或停闭时, 它介于 0 和 1 之间。

用反应性即有效倍增系数与一偏离的份额 $(k-1)/k$ 来代替有效倍增系数是比较方便的,

$$\text{反应性} = \rho = \frac{k-1}{k} = \frac{\delta k}{k} \quad (1.9)$$

当有效倍增系数从 1 变到 $1/(1-\beta)$ 时, 反应性从 0 变到 β 。换句话说, 当反应堆由缓发临界变到瞬发临界时, 反应性增加了 β 。将这种反应性变化指定为反应性的单位 = “1 元” = \$1 是方便的, 它等于反应堆瞬发临界 [$k=1/(1-\beta)$] 与缓发临界 ($k=1$) 两情况之间的反应性之差。将元又进一步分成 100 分 (Φ), 则反应性变化 1Φ 就是 $\Delta\rho=0.01\beta$ 。根据表 1.3 内的 β 值可得到: 对于用 ^{235}U 作核燃料的反应堆, 1Φ 反应性增量是 0.000064。

“过剩 k ”, “ $\delta k/k$ ” 和 “反应性” 这三个术语经常互换使用。正如方程 (1.9) 表明的, 第二个和第三个术语是完全等价的。而用 “过剩 k ” 或 “ δk ” 来等效反应性则是近似正确的, 因为在所有实际情况中, $\rho = \delta k/k = \delta k/(1+\delta k) = \delta k - (\delta k)^2, \dots$, 而 $\delta k \ll 1$ 。

1-3.4 倒时方程

对于 k 是常数的情况 (例如反应性作阶跃变化之后), 基本动力学方程 (1.7) 和 (1.8) 可以求解。作为时间函数的中子密度是

$$n = \sum_{i=1}^{m+1} A_i e^{\omega_i t} \quad (1.10)$$

其中 A_i 的值由初始值 ($t=0$ 时的值) n_0 和 C_{i0} 来决定, 而 ω_i 的值是下列方程的 $(m+1)$ 个根:

$$\rho = \frac{i\omega}{k} + \sum_{i=1}^m \frac{\omega\beta_i}{\omega + \lambda_i} \quad (1.11)$$

β_i 和 λ_i 分别是第 m 组缓发中子发射体的缓发中子份额和衰变常数。

方程 (1.11) 中的根 ω 有下列性质: 对于 ρ 为 >0 的常数, m 个根为负值, 1 个根为正值。这 m 个负根差不多就是缓发中子发射体的衰变常数 $-\lambda_1, -\lambda_2, \dots, -\lambda_m$ 。对于 ρ 为 <0 的常数, 则所有的 $m+1$ 个根都是负值。

这样, 对于反应性是正的常数的情况, 中子密度是一个正指数与 m 个负指数之和。在经过了大于缓发中子周期的时间间隔之后, 正指数项保留

$$n = n_0 e^{\omega_0 t} = n_0 e^{t/T} \quad (1.12)$$

$T (=1/\omega_0)$ 是稳定的反应堆周期或渐近周期, 而 $1/\omega_1, 1/\omega_2, \dots, 1/\omega_m$ 则是瞬变周期。图 1.1 以瞬发中子寿命作为参数, 给出了用 ^{235}U 时的稳定周期和瞬变周期与反应性的关系。注意: 对于 δk 是小的正值的情况, 稳定周期与 1 无关 ($1 \leq 10^{-3}$ 秒); 事实上, 此时 T 近似为 $\bar{l}/\delta k$, 其中 $\bar{l} = 1 + \tau_{sv}$, 而 τ_{sv} 是缓发中子发射体的平均衰变周期, $\tau_{sv} = (1/\beta) \sum (\beta_i/\lambda_i)$ 。 \bar{l} 是有效中子寿命。对于大的 δk 值的情况, 图 1.1 显示的稳定周期近似为 $1/\delta k$ 。

在方程 (1.11) 内, 将 $1/T$ 代替 ω_0 , 就得到反应性与反应堆稳定周期之间的关系。

$$\rho = \frac{1}{Tk} + \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{1 + T\lambda_i} \quad (1.13)$$

这就是倒时方程。反应性可用 “倒时数” 表示, 1 倒时数的定义是使反应堆稳定周期为 1 小时的反应性量。将 $T=3600$ 秒以及表 1.1 内的 β_i 和 λ_i 值代 λ , 且注意到 $1/T \lesssim 3 \times 10^{-6}$, 就可得到下式:

1 倒时数 $\cong 2.4 \times 10^{-5}$ (对于用 ^{235}U 燃料的热堆)

$\cong 1 \times 10^{-5}$ (对于用 ^{239}Pu 燃料的热堆)

$\cong 1.4 \times 10^{-5}$ (对于用 ^{235}U 燃料的热堆)

倒时方程的曲线形式表示于图 1.2, 1.3, 1.4。它们分别画出了用各种铀和钚的同位素作燃料时, 在不同 β 值下稳定周期与反应性的关系。

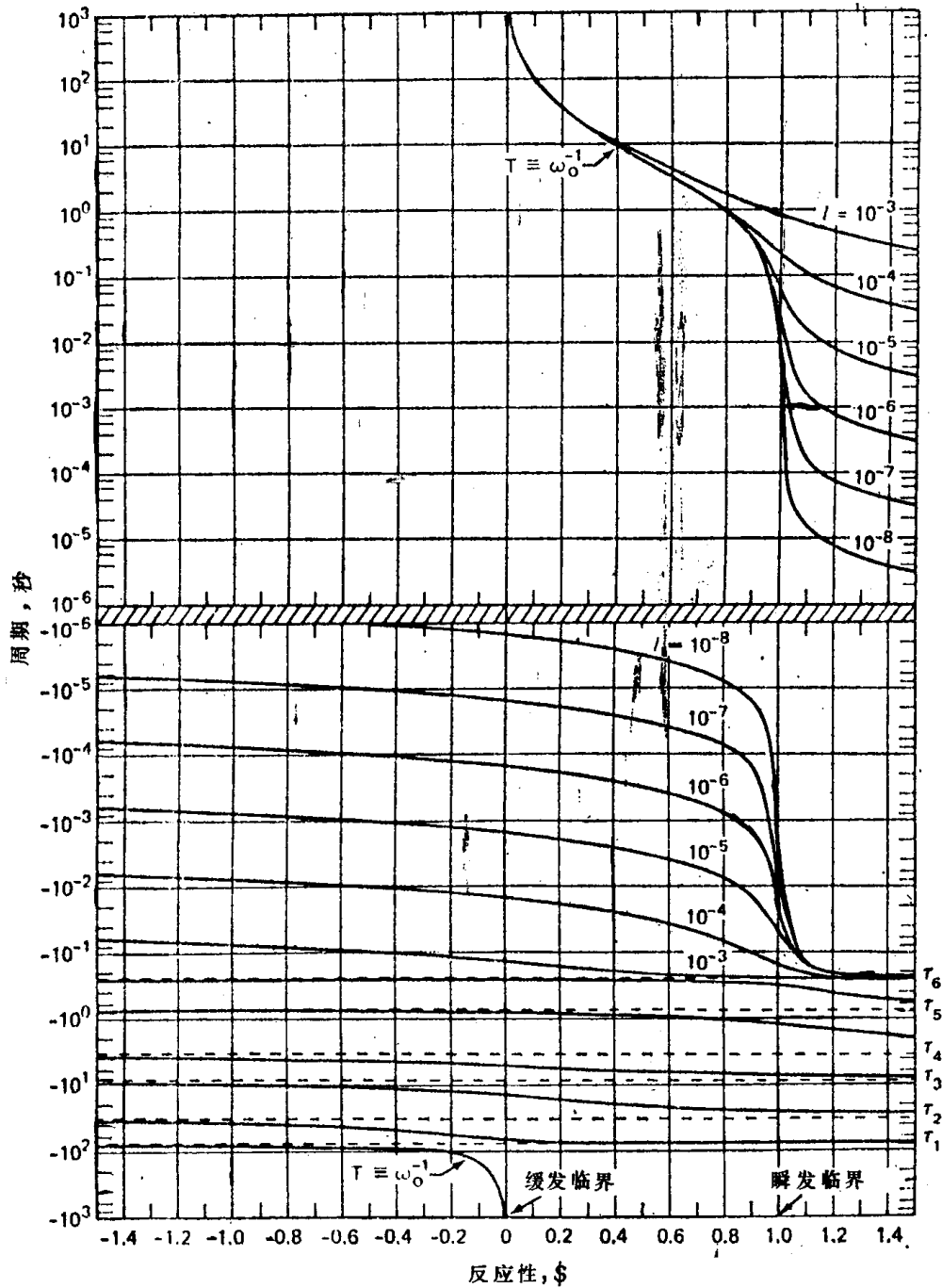


图 1.1 用 ^{235}U 作燃料的反应堆的稳定周期和瞬变周期与反应性的关系

各条虚线是按 ^{235}U 各组缓发中子的平均寿命($\tau_1=1/\lambda_1, \tau_2, \dots, \tau_6$)画出的。参数 β 是瞬发中子的寿命, 单位为秒。[引自 H. C. Paxton and G. R. Keepin, *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, Vol.1, p.262, The M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1964.]

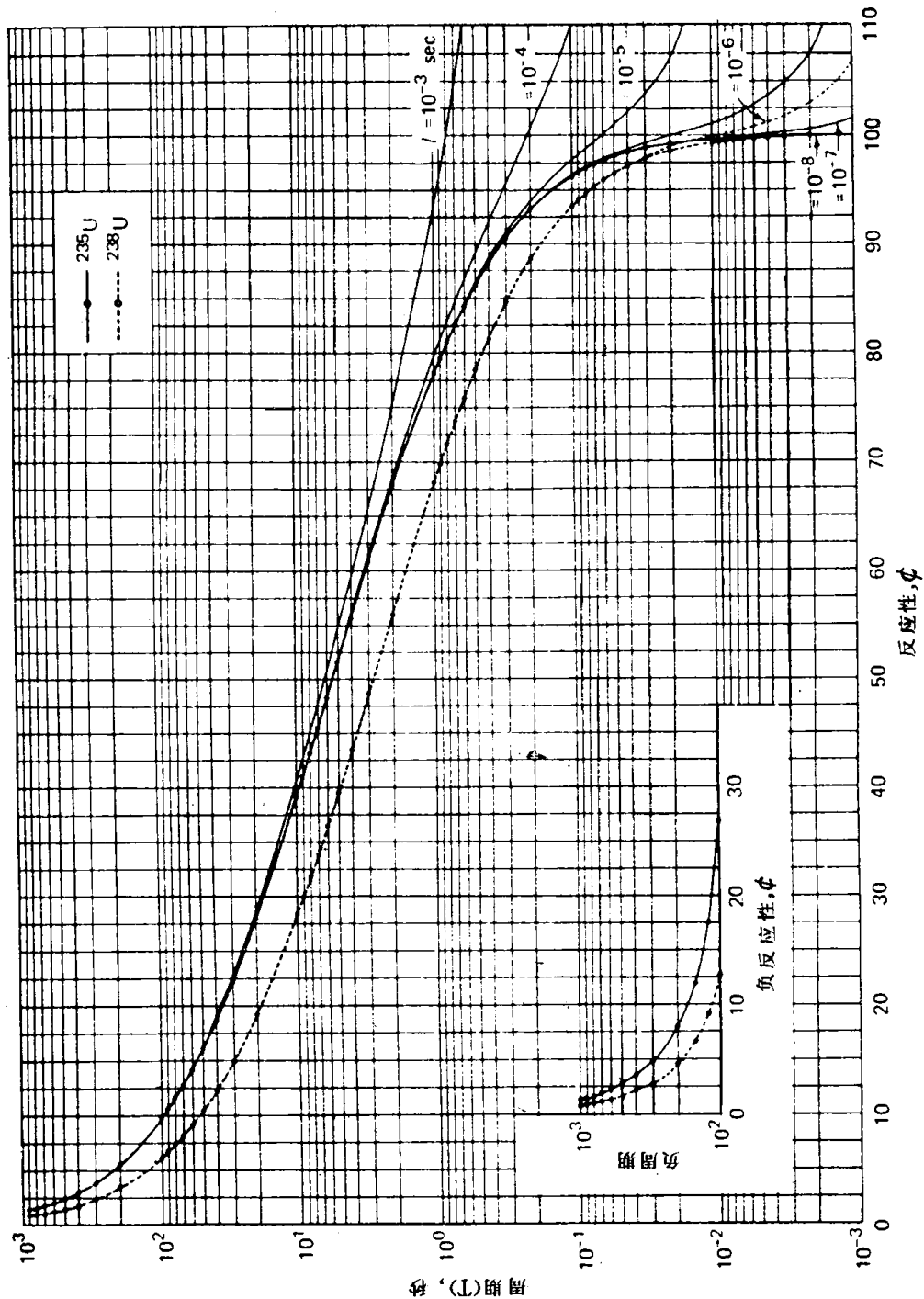


图1.2 用²³⁵U和²³⁸U作燃料的反应堆的稳定(渐近)周期与反应性的关系

参数 λ 是瞬发中子寿命。粗线是用拉氏变换的瞬爆衰减数据计算的;相应的点是由缓发中子的周期和丰度计算而得。[引自 H. C. Paxton and G. R. Keepin, *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, Vol. 1, p.263, The M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1964.]

1-3.5 反应性引入的效应①

当动力反应堆稳态运行时(冷却剂流量恒定,温度不变等)。有效倍增系数为1,反应性

- 这里用术语“反应性引入”来表示增加或减少反应性,是因为一般已经把它看成是一个专业用语。更确切地说,在任何运行时刻,反应性可以是负值、正值或零。举例来说,在启动反应堆,即趋向临界时,添加反应性就意味着将负反应性减小到零。如果在运行时,功率下降而不希望它继续下降时,就说要添加反应性。如果功率稳定但是太低,想要提高时,我们又说要添加反应性。如果功率太高而想要降低时,就说要减小反应性;更确切的意思是引入负反应性使功率降下来。然而,如果要使功率保持在较低的水平上,我们就再一次说要添加反应性,以用来补偿,或使回到反应性为零的状态。

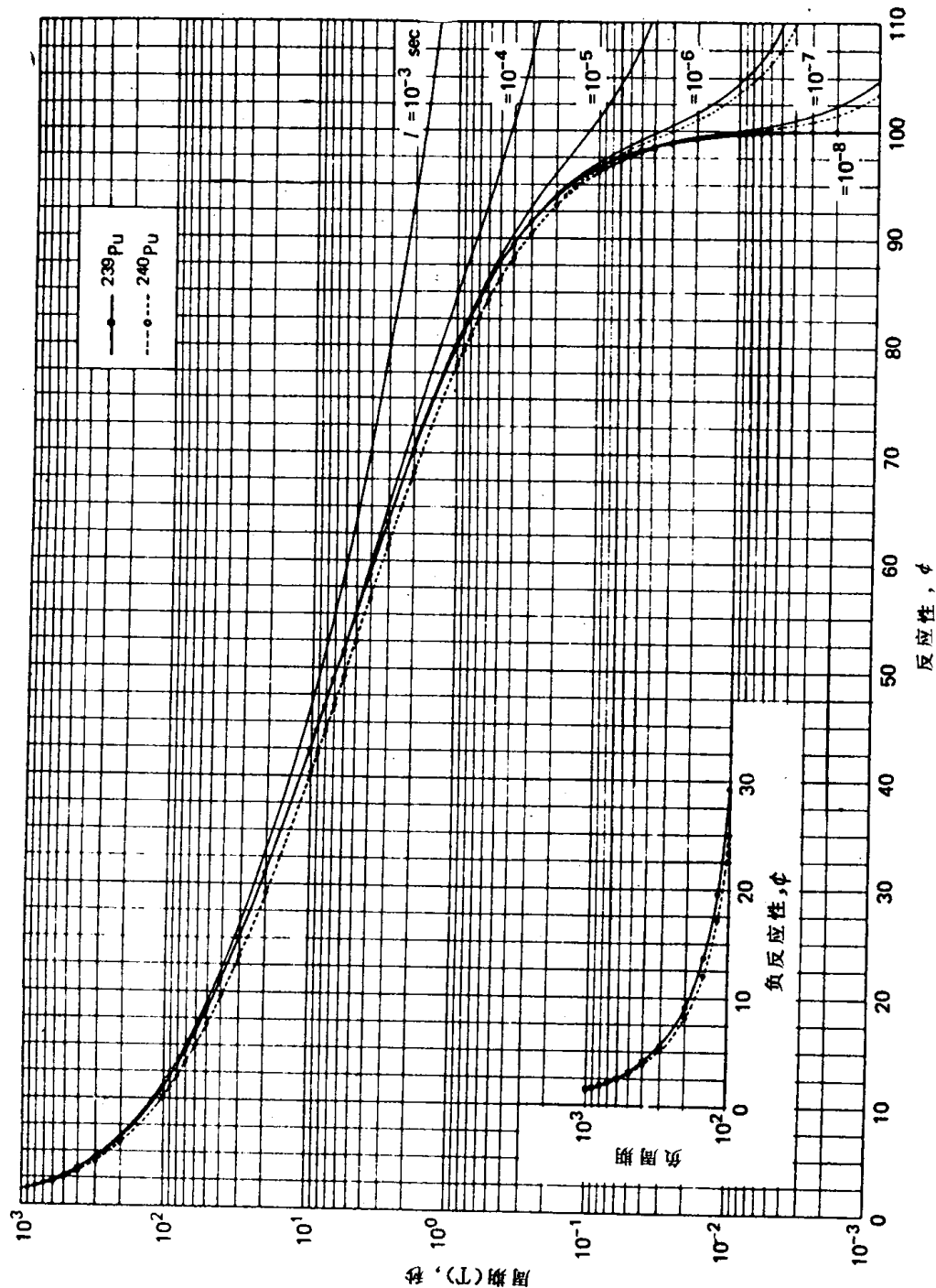


图1.3 用 ^{239}Pu 和 ^{240}Pu 作燃料时稳定(渐近)周期与反应性的关系

图注见图1.2。[引自H. C. Paxton and G. R. Keepin, *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, Vol.1, p.264, The M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1964.]

是零。如果任何一个基本参量，例如冷却剂流量或温度发生改变(如功率水平的上升或下降，或为了补偿燃料反应性的变化)，那么反应性也必须有所增加或减少。最通常的情况是反应性以恒定速率引入或阶跃引入。

在以恒定速率引入反应性(线性引入)使反应堆由缓发临界($\rho = \delta k/k = 0$)过渡到瞬发临界($\rho = \delta k/k = \beta$)的情况下，方程式(1.7)和(1.8)可以解出。图1.5给出了在几种反应性引入速率和几种中子寿命数值下，相对中子密度 $n/n_0 = n(t)/n(0)$ 随时间增加的情形。表1.4用表格方式列出了类似的数据。