

分类号: _____

密级: _____

U D C: _____

编号: _____

工学硕士学位论文

反应堆堆芯核测量数据 在线处理方法研究

硕士研究生 : 范岩成

指导教师 : 曹欣荣 教授

学位级别 : 工学硕士

学科、专业 : 核能科学与工程

所在单位 : 动力与核能工程学院

论文提交日期: 2005 年 1 月 日

论文答辩日期: 2005 年 2 月 日

学位授予单位: 哈尔滨工程大学

Classified Index:

U.D.C:

A Dissertation for the Degree of M. Eng
**Research on Online Data Processing Method
for Nuclear Monitoring of Reactor core**

Candidate: Fan Yan Cheng

Supervisor: Prof. Cao Xinrong

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality: Nuclear Power Science &
Engineering

Date of Submission: January, 2005

Date of Oral Examination: February, 2005

University: Harbin Engineering University

哈尔滨工程大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献等的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）：范岩成

日期：2005年 2 月 27日

摘 要

本文研究的内容是反应堆堆芯核测量数据的在线处理方法，主要监测的数据是反应堆堆芯功率分布，它是评价反应堆安全的一项重要指标，实现在线的堆芯数据处理对核电站的安全稳定的运行有着重要的意义。

本文是在了解了秦山二期核反应堆的堆芯的参数，掌握了核测量的基本原理和研究了离线数据处理基础之上，建立起在线数据处理模型，主要分为在线数据的初步处理、中子通量向反应率的转化和功率的计算，最后编写了在线数据处理程序，实现数据的在线处理。

通过最后的数据结果分析表明，输出的功率能够真实地描述堆芯内实际的功率，建立的在线处理模型是合理的，在线数据处理程序是正确的。

关键词：在线数据处理；核测量；功率分布

Abstract

In this thesis, the online data processing method was studied. The primary detected data were the power distribution in the reactor's core. And the data are very important in the safety analysis of a nuclear power plant.

In this thesis, based on the theory of the nuclear monitoring and the method of the out-line data processing, the model of the online data processing, which was from the reactor core, was built. The model includes the online data primary processing, the transform of the data and account of the power. At last the program of the online data processing was also complied.

Through the analyzing of the out-put data, the model of the online data processing is reasonable.

Key words: online data processing; nuclear monitoring; power distribution

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.2 功率测量方法以及国内外研究的现状 | 3 |
| 1.3 本文研究的内容 | 5 |
| 第 2 章 堆芯结构与物理模型 | 6 |
| 2.1 “核电站堆芯物理在线仿真” 系统简介 | 6 |
| 2.2 堆芯物理概述 | 7 |
| 2.2.1 堆芯的组成 | 7 |
| 2.2.2 堆芯物理过程 | 9 |
| 2.3 反应堆的物理模型 | 11 |
| 2.3.1 理论功率的计算模型 | 11 |
| 2.3.2 理论宏观裂变截面的计算模型 | 14 |
| 2.4 本章小结 | 16 |
| 第 3 章 核测量原理及测量数据的在线处理方法 | 17 |
| 3.1 核测量的基本原理 | 17 |
| 3.1.1 带电粒子的探测原理 | 17 |
| 3.1.2 X 和 γ 射线的探测原理 | 18 |
| 3.1.3 中子的探测原理 | 18 |
| 3.1.4 本底活性 | 19 |
| 3.2 堆芯中子通量监测系统 | 19 |
| 3.2.1 中子通量密度测量的功能 | 20 |
| 3.2.2 堆芯中子通量密度测量系统的组成和布局 | 20 |
| 3.2.3 中子探测器 | 21 |
| 3.2.4 堆芯中子测量系统的工作方法 | 23 |
| 3.3 在线数据处理方法 | 24 |
| 3.3.1 探测数据计算公式的选取 | 25 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3.3.2 在线数据的初步处理 | 29 |
| 3.3.3 在线数据的转化 | 33 |
| 3.3.4 在线数据的计算 | 33 |
| 3.4 本章小结 | 34 |
| 第 4 章 程序的编写调试以及结果分析 | 36 |
| 4.1 编程环境与接口 | 36 |
| 4.2 在线数据处理程序的结构 | 36 |
| 4.3 程序的编写 | 38 |
| 4.4. 在线数据处理的编程实现 | 38 |
| 4.5 程序的调试 | 40 |
| 4.6 在线数据处理结果分析 | 40 |
| 4.6.1 在线数据的来源 | 41 |
| 4.6.2 在线数据的数据转化的结果分析 | 45 |
| 4.6.3 功率输出结果的分析 | 49 |
| 4.7 本章小结 | 55 |
| 结论 | 57 |
| 参考文献 | 58 |
| 攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果 | 60 |
| 致谢 | 61 |

第 1 章 绪论

1.1 概述

目前世界能源的主力依然是煤和石油。这些化石燃料是不可再生的能源，在地球上的储量有限，而且在化石燃料转化成电能的过程中，会造成很大的环境污染。核能的发展与和平利用是 20 世纪科技史上最杰出的成就之一。在核能利用中，核电厂的发展相当迅速，已被公认为一种经济、安全、可靠、环保的能源。核动力技术在多数发达国家得到巨大发展，并成为了一个国家发达程度的一个标准，在很多发展中国家也获得了广泛的认可。世界上的核电厂已有丰富的运行经验和良好的安全纪录^[1]。

据统计，到 2000 年底全世界正在运行的核动力堆共有 438 座，总装机容量达到了 351 千兆瓦，核电所占的比例约为总发电量的 16%。其中法国、立陶宛、比利时和斯洛伐克等国家的核电所占的比重都超过了 50%，而法国及立陶宛的核能发电所占的比重占全国发电总量分别达到了 75%至 80%，在电力生产中已占绝对的支配地位，实现了由化石燃料发电向核能发电的转变^[2]。

我国是个电力需求大国，核电的发展有着一个广阔的市场。自上世纪 80 年代初，我国自行设计建造的秦山一期 30 万千瓦核电机组开始，核电工业已经取得了显著成就。现在我国的核能事业出现了快速的发展苗头，形势喜人：我国自主设计、自主建造、安装和调试的秦山二期 2×600Mwe 核电站 1、2 号机相继投入商业运行，运行业绩优良；我国第二座百万千瓦级核电站—岭澳核电站 1、2 号机组于 2003 年投入商业运行；田湾核电站进入了紧张的施工、安装和调试阶段；在役的秦山核电站和大亚湾核电站运行业绩优良。值得注意的是在积极发展核电的方针指引下，三门核电站和岭澳核电站二期扩建工程最近获得国家批准立项，秦山第二核电厂扩建工程的立项也指日可待，另外，广东阳江，山东烟台和辽宁的大连也都在积极地为建设核电站而筹备着。同时我国未来的新

型核能领域，如中国实验快堆、我国首座球床式高温气冷试验堆 HTK-10、聚变堆和新型试验堆的研究和设计方面都有很大的发展。现在正是我国核能事业大发展的新时期。但是在全国经济大发展的环境下，电力的供给还是难以满足社会发展的需要，在这样的情况下，我国存在着很大的电力缺口，我国的电力的来源主要有三个方面：水电、火电和核电。但对比之下核电还是有着非常明显的特点的。

1. 储量上 火电的燃料主要是一些化石原料，比如说煤、天然气和石油，这些原料首先是不可再生的资源，其次他们本身的储量也不可能满足长期的稳定地人类社会的快速发展的需要，再者这些原料也是很重要的化工原料，若是在电厂把这些重要的化工原料都烧掉也很可惜，我国的铀的储备很丰富，可以满足我国长期的稳定地快速发展的需要^[3]。

2. 经济上 水电的基础投资很大，火电的基础投资虽然不是很大，但火电的燃耗的费用和对本身产生的污染气体的维护费用确实是很高的，经济学家曾经计算过，核能的经济潜力随着时间的推移是越来越大的。

3. 环境方面 火电在运行时要放出大量的导致温室效应的二氧化碳和可以产生酸雨的硫的氧化物还有大量的粉尘等等，如果火电厂处理不好这些方面的事情，他给我们带来的不利的后果要比给我们发电这些有利的方面更大。核电在这方面有其很强的优越性，核电站在运行期间基本上不排放任何有毒的气体，二氧化碳的排放量也是微乎其微的，运行期间也基本上没有粉尘污染^[4]。

核电站的最大的弊端就是它的放射性的问题，美国的三哩岛事故和原苏联的切尔诺贝利事故给人们留下了挥之不去的阴影，也使核电大发展受到了很大的阻碍。如果我们能在反应堆的堆芯的设计和运行方面提高安全性，这两个事故都是可以避免的。

纵观核电与其他电能，在安全的条件下，核电的优势是非常明显的，所以在大力发展核电的同时提高核电的安全性是至关重要的，反应堆的安全性对于一个核电站来说是一个很主要的指标，这样反应堆堆内的物理参数的监测就显得至关重要了。尤其是反应堆的堆内三维功率监测，它是监测反应堆安全与否的重要的参数之一。对于反应堆的功率监测目前有几种方法：中子通量监测、温度监测、压力监测和流量监测等等^[5]。

相比之下,温度监测、压力监测和流量监测适用于电站的稳定运行期间而且对反应堆的功率变化要求不是十分敏感的场所。中子通量的监测则可以根据反应堆堆内的中子通量的变化迅速的监测出某一时刻的中子通量的变化从而计算出这个时刻的反应堆的堆内的功率分布情况。所以要采用反应堆堆芯中子通量密度检测的方法,来对反应堆的功率分布进行监测。

总之,在核电事业蓬勃发展的大环境下,核电站的安全运行是至关重要的,反应堆的堆芯功率分布作为核电安全的重要参数也显得很突出,在许多测量方法中,要保证反应堆在启堆、提升功率、满功率运行和降功率运行等情况下的安全,采用中子通量监测的方法对反应堆的堆内中子通量进行测量,对反应堆的堆芯功率的三维分布进行分析来保证反应堆的安全。

1.2 功率测量方法以及国内外研究的现状

核电站与其他种类的发电厂的主要差别是核反应堆在运行中有核辐射放出,所以核电站设置有核辐射测量系统,目的是从中得到反应堆的功率及分布信息、一些设备的完整性信息、核电站及其周围环境放射性水平的信息等。这些信息直接或间接地被用于保障反应堆的安全运行、工作人员辐射防护和核电站及其周围环境的保护^[6]。

要对核电站的一些设备及核反应堆的堆芯进行监测,仪表是少不了的。核工程监测仪表是用于检测核岛及常规岛中有关参数的仪表,是核设备安全,可靠及经济运行的重要装备之一。测量的主要功能是监测核电站在启动、停闭和正常运行过程中的温度、压力、流量、液位、中子通量及各种机械量在内的各种参数并为自动调节和控制这些参数乃至整个系统运行过程提供精确可靠的信息,进行保证核电站的安全、可靠、正常运行。检测信号分别送往各指示、记录、报警、控制、保护和计算机系统^[7]。

在本文核测量主要是指反应堆的功率测量,功率的计算主要有两种方法,一种是根据热能工程原理,另一种是根据核物理的方法。第一种

方法需要的量主要是温度、压力和流量。利用热力学公式,知道焓熵后就可以计算出来反应堆的功率及其分布。第二种方法主要需要的量是中子通量和宏观裂变截面,这样通过求出燃料的反应率就可算出堆芯的功率分布。这两种方法都能给出比较满意的结果,但是在核电站的运行当中,需要对反应堆的内部的变化有一个比较敏捷而且准确地反馈,这样第一种方法就不太适合这样的要求,只能依靠第二种方法。这主要因为第一种方法中要有温度的变化,而我们知道对于冷却剂—水来说,并不是热的良导体,也就是说在反应堆的温度的变化应该是要有一个时间间隔,这样就对反应堆的功率变化的敏捷性不是很好的满足,第二种方法主要监测的是反应堆堆内的中子通量,而中子通量对反应堆的内部功率分布是几乎成比例的,所以用中子监测法能较好和较快的监测出反应堆堆芯内部功率的变化。本文所研究的主要内容是正常运行工况下时的反应堆堆内功率监测,所以我主要研究用中子通量监测的方法对反应堆堆芯功率分布进行在线监测和在线处理。

目前,对反应堆堆芯功率分布监测主要有两种方法:堆芯内监测和堆芯外监测两种方法。堆芯内监测主要是国外研制出基于堆芯内中子探测器的监视系统,代表性的工作有 ABB/CE 的 CPC 和西门子的 PDD 等。但是,大量固定在芯内的中子探测器不仅成本、安装和维护代价高,而且提供的信号多数是非实时的。堆芯外监测主要是依靠建立起芯外电离室监测值与堆芯功率分布的对应关系,国内清华大学核能院正在研究如何实现芯外电离室监视堆芯三维功率分布,近几年,国外已开发了核电站在线仿真机,能够在线计算堆内物理量的变化,即实现“所见即所得”,最具代表性的是美国西屋公司开发的 BEACON 系统,代表了核电站仿真机的发展方向^[8]。

反应堆的安全性是核电站其他性能的基础,如果一个核电站没有安全性作为基础,在谈其他的性能也是毫无意义的,正是基于这点我们要对反应堆的安全性要有很高的要求。反应堆的堆芯功率三维分布是反应堆的安全性能的重要依据,核电蓬勃发展的今天,在这样的一个先前条件下,我们来研究这个课题有着很深的意义。核电站物理在线仿真,突破了离线的束缚,是监测系统能在任意时刻了解到反应堆堆内的一些物

理状况，这样就可以在任何异常情况出现之前对反应堆的情况进行判断，可以避免事故的发生，这就大大的提高了核电站的安全性。

1.3 本文研究的内容

根据上面说的内容，可以了解到反应堆的堆芯功率的三维分布的重要性，如果能有一个实时在线的堆芯数据处理系统那将会更好的满足核电安全运行的要求。但现在的堆内监测都是离线的，而堆外监测也不能满足对反应堆堆内功率三维分布的要求。本文就是在这方面做一点研究，所做内容是“核电站堆芯物理在线仿真”系统下的一部分。

“核电站堆芯物理在线仿真”系统就是要把在线实时监测的思想用在监测反应堆安全中。本文的主要内容是建立起来一个在线的监测数据处理的方法。主要包括反应堆物理数据监测方法，反应堆物理数据的处理方法，数据的计算模型等内容。

课题的主要工作分以下几个部分：

1. 对反应堆的堆芯结构要了解，中子在堆芯内的物理过程，特别是以秦山二期为研究对象，并对秦山二期的反应堆的堆型和堆芯内的燃料组件的分布方式、组件的长度、探测通道的分布数目和探测器的数目以及探测器本身的本底等等参数要有了解；
2. 对核测量的方法要做一些了解，中子探测器的使用、核探测的注意事项和校核探测的方法；
3. 对离线数据处理程序 DXCL-PC3 程序进行消化，了解 DXCL-PC3 程序的主要功能、能够完成的主要任务、数据输入的格式和方法、数据处理的基本过程以及各个模块的功能和用途，，在在线数据处理等方面参考 DXCL-PC3 程序的方法手段；
4. 在线数据处理的数学模型，这里包括反应堆堆芯的理论中子密度通量、理论宏观裂变截面和理论堆芯功率分布；
5. 写在线数据处理程序，用 V-FORTRAN 编写程序；
6. 调试并运行在线数据处理程序，进行结果分析。

第 2 章 堆芯结构与物理模型

在这一章节里，主要介绍反应堆的内部结构和在进行物理计算时要用到的物理模型。

2.1 “核电站堆芯物理在线仿真”系统简介

“核电站堆芯物理在线仿真”是十五核能开发在役核电站应用技术研究项目的内容，研究的对象是秦山二期反应堆，“核电站堆芯物理在线仿真”系统是一个在线计算仿真系统，可以实时计算反应堆的理论功率和其他理论数据，与反应堆运行同步，这就相当于一个实时在线的堆内参数分析系统。但是，由于在反应堆的运行期间有很多不确定性的存在，仅这样的一个对反应堆实时理论数据的计算系统是不行的，必须还要有一个能连续提供反应堆内的真实参数的系统，这样就可以用这个系统定期的从反应堆堆内提取一些真实的数据，来对前面的实时在线计算的系统提供一个校核的依据，对实时在线计算系统进行纠正，避免因为长时间的引起的误差而使其计算结果失去真实性和可靠性。这样的情况下，只要选择一个适当的时间间隔定期的在反应堆的堆内监测堆芯的数据，在经过计算把实际的堆芯内部的功率三维分布传输到实时在线的仿真计算程序上校正理论计算的堆芯内部的参数(主要是指反应堆的功率三维分布)就实现了核电站的堆芯物理在线仿真。这项工作的基本内容见图 2.1:

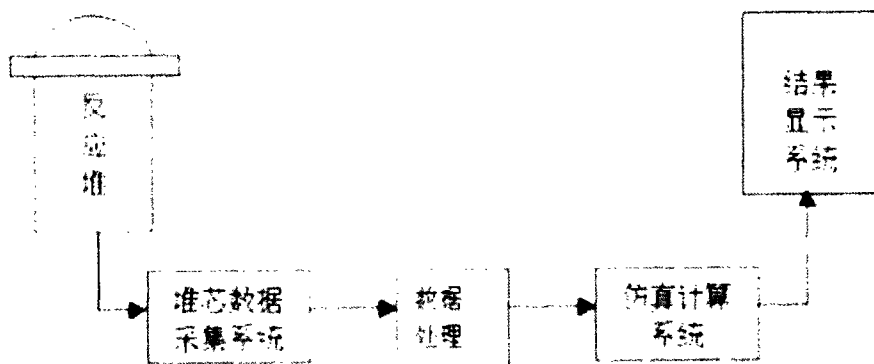


图 2.1 堆芯物理在线仿真示意图

本文是属于计算机在线数据处理的具体实现的一种，计算机数据

在线处理是利用数学模型来研究系统的特性,所以首先要建立系统的数学模型。本章主要是对反应堆的堆芯情况进行说明,特别是针对本文所研究的秦山二期的反应堆的堆芯情况以及堆芯燃料组件的一些参数要进行说明。

2.2 堆芯物理概述

在这里,要对反应堆的堆芯组成和堆芯中子的历程要进行了解,特别是中子的历程,这样才能使我们在对反应堆堆芯物理数据监测中,对设备和原理有了一个比较全面地了解,对本文所研究的方法能有更好地了解。

2.2.1 堆芯的组成

核电站的反应堆是核动力装置的核心部件,一般采用压水堆。这主要是因为压水堆的各种工艺已经比较成熟,又具有负的温度系数,产品已经系列化,比较安全可靠。核燃料(主要是指 U-235)在堆内通过可控链式裂变反应放出热量,冷却剂流过堆芯带走热量,再通过蒸汽发生器把热量传递给二回路,产生蒸汽,供汽轮机做功发电,这样就把热量转化为电能。一个 100MW 的核电站反应堆的堆芯体积约 40 立方米。堆芯由燃料组件、控制棒组件、中子源、可燃毒物组件及其它一些堆内组件组成的。

燃料组件是堆芯发生裂变并释放热量的主要结构,它由燃料元件棒、下管座、上管座、控制棒(或可燃毒物)导向管、定位格架、压紧弹簧等几个部件组成的。先将核燃料(低浓缩度的 UO_2)加工成小的圆柱形芯块,装入燃料包壳管(锆合金)中,然后用压紧弹簧和端塞封住两端构成燃料元件棒,再将燃料元件棒按正方形栅格排列构成燃料组件。

控制棒组件可以快速控制和改变堆内的反应性,从而实现反应堆的启动、停堆、功率改变以及事故工况下的紧急停堆,是保证反应堆安全可靠运行的重要组件。核电站正常工况都是额定功率运行的,只需通过调节硼浓度来补偿反应性的微小变化,只有当反应性有较大变化时(如启堆、停堆等),才需要移动控制棒来改变反应性。控制棒加工成

细棒状，插入燃料组件的导向管中，一定数目的控制棒为一组，一端都固定在同一连接柄上，组成控制棒组件。控制棒组件在堆芯内的上下运动通过控制棒驱动机构来控制。

为了保证反应堆在任何情况下都能安全启动，在反应堆整个寿期内要有足够强度的中子源，分为一次中子源和二次中子源，它们装在包壳管中，再插入燃料组件的导向管中。安装中子源的作用是防止启堆时核测量系统出现测量盲区。

为了降低反应堆运行初期的过剩反应性、减少控制棒数量以及补偿反应堆寿期末由于燃耗和中毒效应等所引起的过剩反应性下降，在反应堆内放置可燃毒物管，采用碳化硼-锆合金。热中子吸收截面很大的硼-10，在堆内不断吸收中子而“燃烧”掉，从而达到降低堆运行初期的过剩反应性和补偿堆运行末期的反应性下降之目的。可燃毒物管也插入燃料组件的导向管中。

堆内构件大体可以分为三个部分：堆芯下支撑组件、堆芯上支撑组件和热屏蔽。它的功用主要是固定燃料组件，承受堆芯重量；保持燃料组件的定位以及燃料组件与控制棒组件之间的对中，并保证控制棒的正常运动；分割冷却剂流程并引导冷却剂按规定的流程流动，以保证堆芯的流量分配；起到对中子和 γ 射线的屏蔽作用。

水作为慢化剂和冷却剂，靠主泵提供的驱动压头流过堆芯，一方面把裂变产生的快中子慢化成热中子，另一方面将反应堆堆芯产生的热量带出堆芯，在蒸汽发生器内进行热交换把热量传递到二回路。

在本课题中，这里要详细介绍一下秦山二期的反应堆堆芯的基本结构，见图 2.2。

这就是秦山二期的反应堆堆芯燃料组件的二维布置图，上方的数字和左侧的字母分别表示燃料组件的横坐标和纵坐标，这样提到那组燃料组件就能很快地找到它的位置。在这里，可以看到反应堆的堆芯是有 121 组燃料组件组成的，组件内带的数字是表示有探测通道的燃料组件的编号，这样也就可以知道了每组测管组件的坐标位置，燃料组件的编号是这样的，H 1 是第一组燃料组件（为了便于说明以后就把有探测通道的燃料组件叫做测管），G 1 为第二组，F 1 为第三组，K 2 为第四

组。

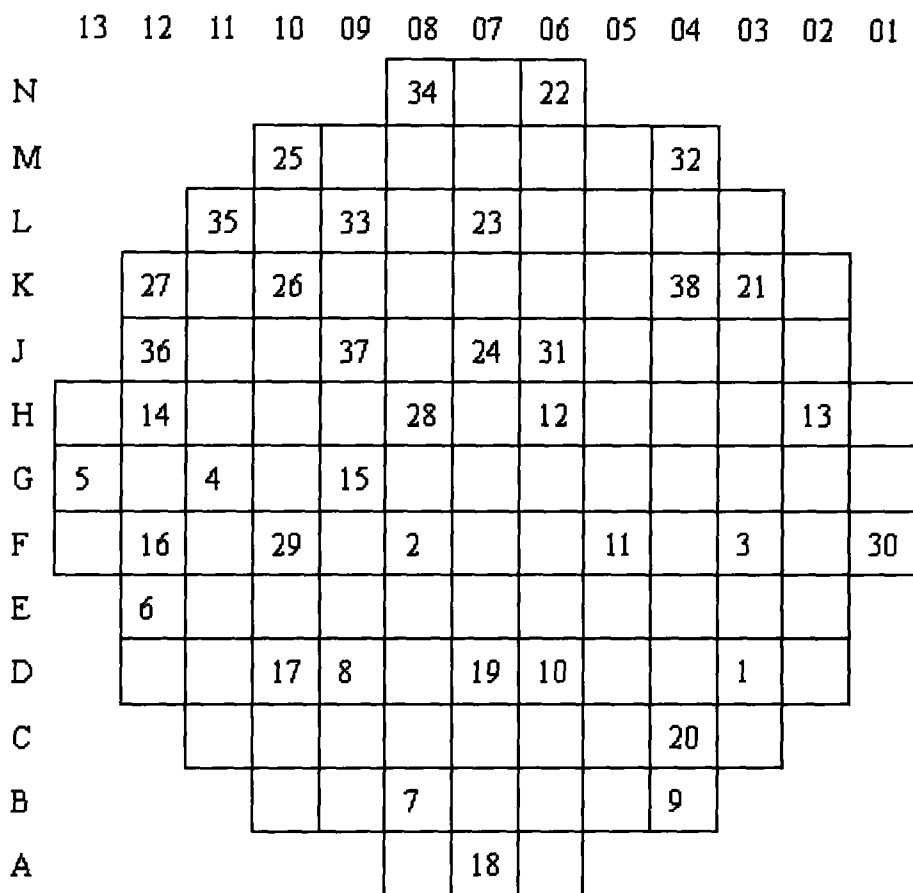


图 2.2 秦山二期燃料组件二维分布图

这样依次类推就将这 121 组燃料组件的编号和位置就确定了。此外,反应堆的堆芯高度为 365.8cm,堆芯燃料组件的中心距是 21.504cm,假设这个图的原点就是 G7 这一点,这样就不仅知道了每根燃料组件的符号坐标也知道了每根组件的实际坐标。另外,在轴向上,又平均分成了 46 段和 16 段两种轴向节块位置点,以后说到那个点的数值其实说的就是这个节块内的平均数值,以上这些数据的确定和划分在后面的计算中有着很重要的作用,这样也便于数据的分析。

2.2.2 堆芯物理过程

对于本文来说了解中子的历程是很关键的,在反应堆内,中子与介质核相互作用,发生弹性散射或非弹性散射,速度变慢了,这一过程

称为中子的慢化。对压水堆而言，中子的慢化特别重要，慢化过程以弹性散射为主，非弹性散射只起次要作用。同时，中子在堆内不停的运动，从密度高处向密度低处输运，这是一个扩散过程。中子在慢化与扩散的过程中，还可能发生各种反应。中子可能被堆内的慢化剂、冷却剂、结构材料、控制材料以及反应堆运行过程中产生的裂变碎片等吸收。发生最多的是热中子反应，相当多的热中子会被易裂变核所吸收而引起裂变反应，同时放出能量并发射出速度较快的裂变中子。其中一部分快中子，直接引起 ^{238}U 等发生裂变而放出裂变中子，这就是快中子裂变。此外，在慢化过程中，有一部分快中子可能泄漏出堆外，还有一部分快中子则可能在慢化成热中子后泄漏出堆外。这就是中子的慢化、扩散、吸收以及引起裂变反应和泄漏损失的过程。图 2.3 为以铀为燃料的热堆内中子的循环图。

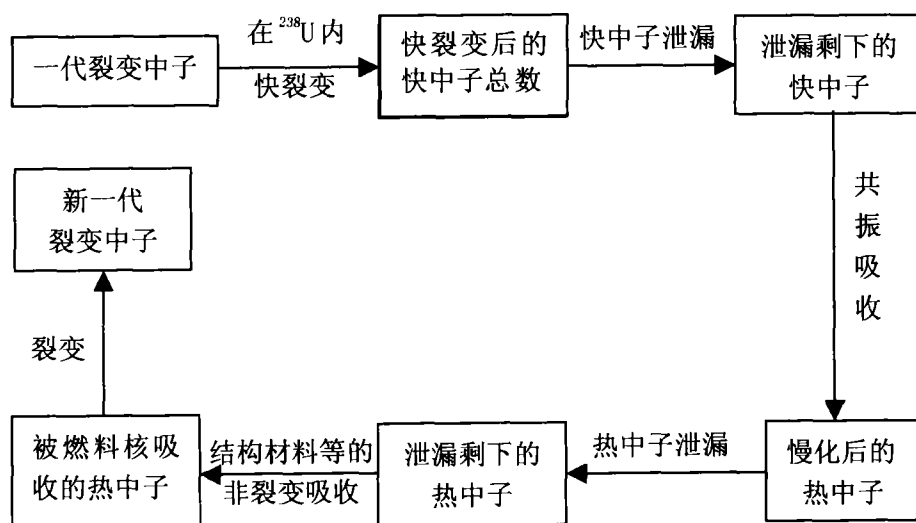


图 2.3 堆内中子的循环

与此同时，裂变产生的一些裂变碎片还会发生衰变，放出中子。但是不同的裂变产物，半衰期也不同。这就使得一部分中子在裂变后的一段时间才发射出来。这些裂变碎片称为缓发中子先驱核，目前已知的有十多种以上。常用的处理方法是根据半衰期的长短分为 6 组，各组的

相关参数如表 2.1 所示。表中产额 y_i 指第 i 组每次裂变产生的中子数，份额 β_i 指第 i 组裂变中子占总裂变中子的百分比。

表 2.1 ^{235}U 热中子裂变的缓发中子先驱核数据

| 组号 | 半衰期 $T_{1/2}$, 秒 | 衰变常数 λ , 秒 ⁻¹ | 产额 y_i | 份额 β_i |
|----|-------------------|-------------------------------------|----------|--------------|
| 1 | 55.72 | 0.0124 | 0.00052 | 0.000215 |
| 2 | 22.72 | 0.0305 | 0.00346 | 0.001424 |
| 3 | 6.22 | 0.111 | 0.00310 | 0.001274 |
| 4 | 2.30 | 0.301 | 0.00624 | 0.002568 |
| 5 | 0.610 | 1.14 | 0.00182 | 0.000748 |
| 6 | 0.230 | 3.01 | 0.00066 | 0.000273 |

虽然缓发中子占的份额不大，但对于反应堆的控制有重要意义。正是由于缓发中子的存在，才使得中子的寿命从 10^{-4} 秒延长到了 0.1 秒，从而使反应堆控制成为可能。

定义反应堆的有效增殖因子

$$k = \text{中子的产生率} / \text{中子的消失率}$$

当有效增殖因子等于 1 时，反应堆内中子的产生率等于消失率，反应堆处于稳定状态，这时称反应堆达到临界。当有效增殖因子小于 1 时，反应堆内中子的产生率小于消失率，反应堆内的中子数目将不断减少，这时称反应堆处于次临界。当有效增殖因子大于 1 时，反应堆内中子的产生率大于消失率，反应堆内的中子数目将不断增加，这时称反应堆处于超临界。

2.3 反应堆的物理模型

反应堆的物理计算是为以后的测量计算服务的，它主要是进行反应堆的理论数据的计算如计算反应堆的理论功率，反应堆的理论宏观裂变截面等等。

2.3.1 理论功率的计算模型

反应堆的理论功率的计算中既可以用热工计算功率也可以用中子

通量的方法来计算,前面已经说过本文主要要依靠中子的探测来进行计算的所以我们就介绍中子的理论计算方法。在计算堆芯功率的模型中,有点堆模型法和扩散理论法等方法^[9],点堆模型有一个前提,就是假定反应堆的堆芯内部的功率分布是均匀的,这就与本文研究的目的是不相符的,所以本文没有选择它作为计算模型,而是选择了更符合本文要求的扩散理论方法为基础的理论功率计算。

在核电站中,一般就是用的是两群扩散理论模型来计算反应堆中中子的物理状态的。

下面本文先给出计算理论功率的扩散方程^[10]。如下:

堆芯物理仿真模型采用二群三维带 6 组缓发中子的扩散模型:

$$\frac{1}{v_1} \frac{\partial \phi_1(r,t)}{\partial t} = \nabla D_1 \nabla \phi_1(r,t) - \Sigma_{a1} \phi_1(r,t) - \Sigma_{1-2} \phi_1(r,t) + (1-\beta) [\nu_1 \Sigma_{f1} \phi_1(r,t) + \nu_2 \Sigma_{f2} \phi_2(r,t)] + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(r,t) + S(r,t) \quad (2-1)$$

$$\frac{1}{v_2} \frac{\partial \phi_2(r,t)}{\partial t} = \nabla D_2 \nabla \phi_2(r,t) - \Sigma_{a2} \phi_2(r,t) + \Sigma_{1-2} \phi_1(r,t) \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial t} = \beta_i [\nu_1 \Sigma_{f1} \phi_1(r,t) + \nu_2 \Sigma_{f2} \phi_2(r,t)] - \lambda_i C_i(r,t) \quad (2-3)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

- v_1 —— 快中子平均速度, m/s
- v_2 —— 热中子平均速度, m/s
- Σ_{a1} —— 快中子吸收截面, cm^{-1}
- Σ_{1-2} —— 转移截面, cm^{-1}
- Σ_{a2} —— 热中子吸收截面, cm^{-1}
- S —— 外部中子源项, n/s
- β_i —— 缓发中子份额
- ϕ_1 —— 快中子通量, $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$
- ϕ_2 —— 热中子通量, $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$

- D_1 —— 快中子扩散系数, cm
 D_2 —— 热中子扩散系数, cm
 Σ_{f1} —— 快中子裂变截面, cm^{-1}
 Σ_{f2} —— 热中子裂变截面, cm^{-1}
 ν_1 —— 快中子裂变产额
 ν_2 —— 热中子裂变产额
 C_i —— 缓发中子先驱核密度, $1/\text{cm}^3$
 λ_i —— 缓发中子先驱核衰变常数, s^{-1}

方程(2-1)左边表示快中子密度的变化率,右边第一项表示扩散快中子的泄漏率,第二项表示快中子的吸收率,第三项表示由于散射慢化快中子向热中子的转移率,第四项表示由于裂变产生的瞬发快中子的产生率,第五项表示缓发中子的产生率。

方程(2-2)左边表示热中子密度的变化率,右边第一项表示由于扩散热中子的泄漏率,第二项表示热中子的吸收率,第三项表示由于散射慢化快中子向热中子的转移率,这也是热中子的源项。

方程(2-3)左边表示某组缓发中子先驱核密度的变化率,右边第一项缓发中子先驱核的产生率,第二项表示由于衰变缓发中子先驱核的消失率。

这里还涉及到边界条件的确定:

边界条件分为两种情况,一种是物理边界条件,另一种是与其他系统的接口参数。

1. 物理边界

- 1) 整个堆芯内,中子通量必须非负,且处处有界;
- 2) 堆内任意一个交界面上,中子通侧的中子通量 ϕ 是相等的,如图 2.3 所示;

$$\phi|_A = \phi|_B$$

- 3) 堆芯实际边界上中子的运动情况比较复杂,有冷却剂和反射层,不易用简单的数学模型表示。因此引入外推边界条件,认为:在物理边界以外的外推边界上,中子通量为零,如图 2.4 所示。

$$\phi|_A = 0$$

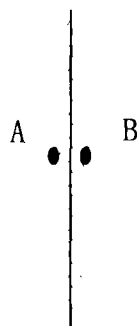


图 2.3 连续边界条件

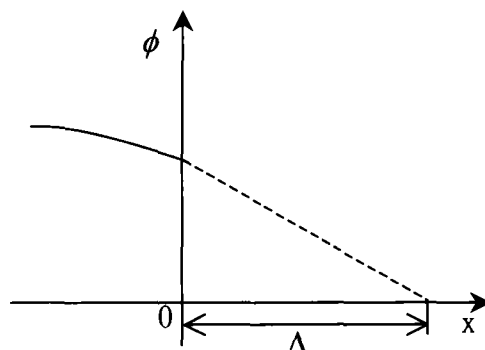


图 2.4 外推边界条件

至于外推长度 Λ 的大小需根据实际情况计算。

2. 与其他系统的接口，堆芯物理系统与主冷却剂系统、核测量系统和棒控系统有接口。

冷却剂流过堆芯带出热量，由主冷却剂系统计算并传递给堆芯物理系统的燃料温度、慢化剂温度(或密度)等参数均影响堆芯动态特性，同时主冷却剂系统还需要堆芯功率，堆芯物理系统将根据有关参数计算堆芯核功率并传递给主冷却剂系统。

棒控系统是反应堆正常启堆和正常停堆，并在各种工况下完成控制棒提出堆芯和插入堆芯，改变堆芯反应性的控制棒操作系统。在反应堆功率自动调节时，棒控系统的调节棒组接受功率调节装置送来的自动棒速信号和棒运动方向信号，实现反应堆功率自动跟踪负荷的变化，并保持在需要的功率水平上，所以堆芯物理系统与棒控系统有接口。堆芯的总功率及其分布都取决于控制棒的位置，程序中控制棒的位置通过棒控系统仿真计算。

堆芯的特性，特别是功率分布，通过堆外探测器(功率量程、中间量程和源量程)监测。

2.3.2 理论宏观裂变截面的计算模型

在本文中，宏观裂变截面的概念是很重要的，在中子通量数据转化为反应率的数据过程中很关键，下面就对这个概念说明一下。

为了定量说明核反应的几率大小，通常引进“反应截面”的概念。

如果某种物质受到中子的作用,则发生特定核反应的速率取决于中子的数目和速度以及这种物质中核的数目和性质。对于任一特定反应的靶核,“截面”是中子与核相互作用概率的一种量度,它又是原子核和入射中子能量的一种特性。

1. 微观截面

假设在 1 立方厘米的物质中,有 N 个原子核,在这个物质的一个面上射入一个中子,我们把每一个原子核与一个入射的中子发生核反应的几率定义为微观截面 σ ,单位是靶,是面积单位,1 靶= 10^{-24} 厘米²。由于中子与物质的相互作用有裂变、散射、吸收之分,所以微观截面相应地也分为微观裂变截面 (σ_f)、微观散射截面 (σ_s) 和微观吸收截面 (σ_a) 等。各微观截面值的大小不但与同位素种类及中子能量大小有关,而且同一种原子核和中子发生不同核反应时,其微观截面值也有很大差别。所以,尽管微观截面是以面积为单位来表示,但微观截面并不是原子核的几何面积。有时截面比几何面积小,有时截面要比几何面积大得多。例如,碳核的吸收截面约为它的几何面积的千分之一,而氙核的吸收截面却比它的几何面积大一百万倍左右。

2. 宏观截面

如果每立方米的物质中含有 N 个核,则乘积 σN 等于每立方米靶核的总截面,称宏观截面,用符号 Σ 表示,它的量纲是长度的倒数

$$\Sigma = \sigma N \quad \text{m}^{-1} \quad (2-4)$$

宏观截面的物理意义是:中子行走单位长度路程中与原子核发生核反应的几率。例如,宏观吸收截面 $\Sigma_a = \sigma_a N_a$ 表示中子行走单位长度路程被原子核吸收的几率。

这样就可以将反应堆内的理论宏观截面求出来了。

在这一节里,介绍了理论功率和理论宏观裂变截面的基本概念和简单的求法。这样一来,在反应堆堆芯功率时,所用的理论参量在这里就都给出了(理论中子密度通量和理论的宏观裂变截面)。只要测管组件的测量值进入,那么整个堆芯的三维功率分布就能计算出来了。

2.4 本章小结

本文首先地介绍了“核电站堆芯物理在线仿真”系统的内容，以及秦山二期的反应堆的堆芯情况，对研究题目有一个整体的认识。后面
对反应堆的堆芯组成和物理过程进行了说明。最后给出了反应堆的理论
功率计算模型和理论宏观截面计算的模型。

第3章 核测量原理及测量数据的在线处理方法

3.1 核测量的基本原理

为了便于对探测数据进行说明,在这里还要对监测仪表进行简单的介绍。

各种核辐射的探测原理都有与它们核物质的相互作用密切相关,但最基本的是利用带电粒子在物质中对物质原子产生的电离和激发效应;对能量较高的带电粒子,也利用它们穿过物质时的电磁辐射效应。核辐射探测的基本方法是利用各种类型和规格的核辐射探测器探测得到的探测器的输出信息,用核电子学线路(设备)处理(包括放大、成型、甄别、变换、分析、记录等);核辐射探测器的输出信息,或是与被探测的核辐射强度成正比的电信号(例如脉冲计数率或直流电流)或是与每个核辐射事件的能量成正比的脉冲幅度,或是与每个核辐射事件所发生的时间间隔大小成正比的信息,从而达到所要探测的目的。

3.1.1 带电粒子的探测原理

中子虽然是属于不带电的粒子,但我们在测量时,还是要对带电粒子的探测原理有所了解。

探测带电粒子所依据的原理是带电粒子与物质原理发生的三种主要的相互作用。

1. 离和激发效应。带电粒子与核外轨道电子之间存在库仑力的相互作用,发生非弹性碰撞,导致带电粒子损失能量,物质原子被电离或激发。
2. 弹性碰撞。带电粒子与物质原子核发生库仑相互作用,产生非弹性碰撞,使入射带电粒子的速度和方向发生改变,伴随产生韧致辐射。这样作用对电子来说很明显,而对 p 、 α 和其他重带电粒子来说,这种作用的概率很小,主要是使原子核产生库仑激发。

3. 弹性碰撞。带电粒子与原子核之间因库仑力相互作用，产生弹性散射，即弹性碰撞，致使入射带电粒子改变了运动方向并损失能量，但不产生电磁辐射，也不使原子核受激发，而是使原子核受到反冲而获得能量，使晶格原子产生位移，形成缺陷，即在物质内产生带电粒子的径迹。

3.1.2 X 和 γ 射线的探测原理

由于 X 和 γ 射线不带电荷，它们不能像带电粒子那样在物质中直接产生电离和激发效应，因此不能直接被探测到，而是通过它们在物质中的光电效应、康普顿散射和电子对产生效应生成的次级电子在引起物质的激发间接测到的^[11]。

由于本论文涉及到的是堆芯的中子探测，与此相关很少，在此就不做说明。

3.1.3 中子的探测原理

中子不带电，中子不受库仑场的阻碍，所以很容易靠近原子核或被原子吸收，而与原子发生以下作用过程：

1. 弹性散射 (n, n)
2. 合核
 - 1) 弹性散射 (n, n)
 - 2) 非弹性散射 (n, n')
 - 3) 产生带电粒子的核反应 (n, b)
 - 4) 辐射俘获 (n, γ)
 - 5) 发射多粒子的核反应
 - 6) 核裂变 (n, f)

3. 直接作用中间过程

用于中子探测器探测的主要作用过程(或机制)是弹性散射、产生带电粒子的核反应和核裂变。这是因为中子不带电，它进入物质后不能直接引起物质原子的电离和激发，它的探测只能利用中子与原子核相互作用产生的各种带电粒子或 γ 射线间接探测。通

常与中子发生作用的原子称为核靶。

因此，相应的就有以下几种方法探测：

1. 反冲法 利用中子与物质原子核发生弹性散射这种作用探测中子的方法称为核反冲法。
2. 反应法 利用产生带电粒子核反应，通过探测带电粒子来间接探测中子的方法。
3. 核裂变法 快中子和热中子都能引发重核裂变，重核裂变生成的几个中等质量原子称为裂变碎片，裂变碎片是重带电粒子，能使物质原子电离或激发。通过探测器探测裂变碎片探测中子的方法称核裂变法。

测量中子的探测器主要包括以下几种：气体探测器、半导体探测器和闪烁探测器。

3.1.4 本底活性

在进行核测量时，有一点不能被忽视，就是本底的存在，本底会使探测器探测到的数据和真实值有一定的差距，这样会使最后的计算结果出现错误，所以在本章的后面的探测数据的处理中还有一部分就是专门进行降低本地活度的处理。

本底的主要来源主要有：宇宙射线、周围环境的放射性核素和屏蔽材料及探测器件中的放射性核素^[12]。

降低本底，就要根据本底的来源，采用不同的措施。

3.2 堆芯中子通量监测系统

堆芯在线数据处理中，需要的是堆芯内测管组件的裂变反应率，但是没有直接测量测管组件的反应率的仪表，而是通过测量它们的中子通量密度，在用这些数据来计算出测管组件的反应率的数值。

压水堆核电站的堆芯中子通量密度测量系统是为获得堆芯功率分布(用反应堆堆芯中子通量密度分布表示)而设置的。堆芯中子通量密度分布是核反应堆的重要的物理参数。在反应堆启动过程中，堆芯中子通

量密度测量比较频繁,而在反应堆正常功率运行期间,每个月测量一次到二次。但是中子通量密度数据不管在反应堆正常功率运行期间还是在反应堆启堆过程期间,都是很重要的反应堆控制用的数据^[13]。

3.2.1 中子通量密度测量的功能

堆芯中子通量密度测量系统将测量得到的各中子通量密度值以测量栅格的中子通量密度图形纪录和显示,计算机将这些中子通量密度数据处理后在以功率分布数据形式发出。本文只是用作对反应堆堆芯功率分布提供计算数据,可是这并不是中子通量密度测量全部功能,下面就是对中子通量密度测量的功能作一下简单的介绍。

1. 反应堆的启动过程中:

- 1) 证反应堆寿命初期的功率是否与设计要求相符;
- 2) 证热点因子是否有余量(即验证用于事故分析中的热点因子相对于实际值确实是偏保守的);
- 3) 刻度反应堆功率测量系统的电离室;
- 4) 检测反应堆装料时可能出现的差错。

2. 反应堆正常功率运行中:

- 1) 验证反应堆功率分布与燃耗的关系是否符合设计要求;
- 2) 为换料方案最优化提供燃耗数据的历史资料;
- 3) 校验反应堆功率测量系统的电离室;
- 4) 检测反应堆堆芯运行参数有无偏离正常值(即监测反应堆堆芯功率分布是否异常)。

3.2.2 堆芯中子通量密度测量系统的组成和布局

压水堆核电站堆芯核燃料组件中安装有堆芯中子通量密度测量导向管,这种导向管的数量和布局与堆芯设计有关。我国秦山一期 300MW 压水堆核电站的堆芯有 30 个中子通量密度测量导向管,大亚湾 900MW 压水堆核电站的堆芯有 50 个堆芯中子通量密度探测导向管。本文是研究的是秦山二期,这里是 38 个导向管分成 4 组,每组配备一个中子探测器,一套机电设备,一套电子设备和控制设备。机电设备放置在反应

堆的堆坑旁边的堆芯仪表室内,电子学设备和控制设备安装在测量控制柜中。由于堆芯内的 38 个导向管的管壁直接与一回路的水接触,由于机电设备驱动各探测器在导向管内以测量个导向管内各点的中子密度。所以,堆芯中子通量密度测量系统的密封相当重要。一回路水泄漏会影响探测器的测量,密封段要安装泄漏探测器^[14]。

探测器得到的中子通量信息有电子学电路处理、记录和显示,而探测器在那个管内测量、移动方向、移动速度极测量方式由逻辑电路发送的控制信号通过测量与控制柜前面板上的开关按钮及机电设备的动作来控制。

在探测过程中,还需要选择器。选择器实际为转换设备。我们知道一共有三种选择器:组选择器、路—组选择器和路选择器。虽然各种选择器的作用不同,但其内部结构和动作原理是完全一样的,唯一不同的是可选通道的数目不同^[15]。

每个选择器有一个用传动电机带动的选择器磁鼓和离合器系统组成。

组选择器有一个输入道,三个或四个输出道。组选择器可以将探测器从起始位置分别导向十个正常通道、十个救援通道、一个校验通道及贮藏通道。

路—组选择器有两个或五个输入道,一个输出道。路—组选择器能够将探测器分别从本组的组选择器、救援组的组选择器、公共校验测量时的各自的组选择器的输出道导向它们各自的路选择器。

路选择器有一个输入道,十个输出道。路选择器能够将探测器从它们各自的路—组选择器的输出道依次分别导向各组的十个通道。

要知道第一组作为第二组的备用,第二组作为第三组的备用,第三组是作为第四组的备用。参考校验通道在第四组所以第一组、第二组为备用^[16]。这一结构在后面的数据校核中起了很重要的作用,只有让不同的探测器同时探测同一个探测通道才能把 4 个探测器的探测标准统一起来。

3.2.3 中子探测器

堆芯中子测量系统采用的中子探测器是微型裂变电离室。微裂变室的输出的输出电流信号经过电子学线路的 I/V 转换, 输出电压信号分为两路并行传输: 一路直接送入该系统地记录仪; 另一路经电离室放大后, 送到计算机进行数据处理, 裂变室由端塞、测量区同心外壳、同轴电缆等组成。微裂变室的外径为 4.7mm, 长度为 66mm, 灵敏区长 27mm。它的外壳、外电极、心极及同轴电缆的材料均为不锈钢, 绝缘材料为 AL_2O_3 。灵敏体积内充有纯度为 99.9995% 的氙气, 充气压为 $1.1 \times 10^5 Pa$ 。微裂变室的电极表面涂一层 UO_2 , 其质量厚度为 $0.3mg/cm^2$ 。涂层的 ^{235}U 的丰度为 93%。

微裂变室探测堆芯中子的原理是这样的: 反应堆堆芯的热中子射入微裂变室的灵敏体积内打在涂有 UO_2 的电极上, 热中子使 ^{235}U 核发生核裂变, 裂变碎片是重离子(即是一种重带电粒子), 它使氙气电离而产生输出电流 I_0

$$I_0 = S_n \varphi \quad (3-1)$$

S_n 为微裂变室对热中子的灵敏度, 单位为 $A/(n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})$; φ 为测点出热中子通量密度, 单位为 $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 。这里的 S_n 可以这样求得:

$$S_n = N_{f5} q e \quad (3-2)$$

其中 N_{f5} 为每秒钟裂变的 ^{235}U 的核数, 它可以由 ^{235}U 的裂变微分截面 $\sigma_{f5} (= 580 \times 10^{-24} cm^2 = 580b)$ 、铀涂层的质量厚度 $M (= 0.3mg \cdot cm^{-2})$ 和面积 $S (= 2.5cm^2)$ 及铀涂层中 ^{235}U 的丰度 $T (= 0.93)$ 求出:

$$N_{f5} = \sigma_{f5} N_A M \cdot S \cdot T / A \quad (3-3)$$

N_A 是阿伏加德罗常数 ($6.02 \times 10^{23} mol^{-1}$); A 为 ^{235}U 的相对原子质量 ($235 = A$); (3-2) 中的 e 为基本电荷 ($= 1.6 \times 10^{-19} C$); q 为每个 ^{235}U 核裂变时裂变碎片产生的平均电离电离数:

$$q = E_m / w \quad (3-4)$$

E_m 为每个 ^{235}U 裂变时裂变碎片的能量, 约为 $2.6 \times 10^3 eV$; w 为氙气的平均电离能, 约为 $26.4eV$ 。

综上所述, 可以得到微裂变室的热中子的灵敏度为 $1.63 \times 10^{-17} A/(n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})$, 输出电流 I_0 与热中子通量密度 φ 的关系式:

$$I_0 = 1.63 \times 10^{-17} \varphi \quad (3-5)$$

微裂变室所探测的堆芯热中子通量密度范围是 $10^9 n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 到 $1.4 \times 10^{14} n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ ，由 (3-5) 式可得到微裂变室的最大的输出电流约为 $2mA$ 。

在反应堆寿命期间内微裂变室测得的积分中子通量密度约为 $10^{20} n \cdot cm^{-2}$ ；在寿命期间内裂变室的中子灵敏度的减少小于 10%；为裂变室的 γ 灵敏度小于 $2 \times 10^{-14} A/(R \cdot h^{-1})$ ，位置分辨率为 2mm。

3.2.4 堆芯中子测量系统的工作方法

测量系统的工作方式是指在堆芯中子通量密度测量时有这样的程序。

首先对 4 个中子探测器进行相互校验即“校验通道序列”测量，然后进行“组同步”测量或“组序列同步”测量。这里打引号的地方均为有同语指令。

由于堆芯中子测量系统中的 4 个中子探测器（微裂变室）在制造过程中不可能有完全一样的中子灵敏度，因此，在进行堆芯中子通量密度测量之前，必须对 4 个微裂变室在同一个校验通道进行互相校验，即进行“校验通道序列”测量。

“校验通道序列”测量即将 4 个微裂变室依次送入指定的一个通道进行互相校验。本文的测量系统一般情况下是把第四通到作为校验通道。

“校验通道序列”测量的步骤是：

1. 开电源并将计算机清零；
2. 作方式转换开关置于“序列校验”，从而就从序号为 1 的微裂变时开始依次进入校验通道。同时，组选择器相应从序列号为 1 的开始，依次置位于“校验”位置。第四个路—组选择器从选择“校验 1”开始，依次至于“校验 4”。第四个路选择器选择校验通道；
3. 压下“同步启动”，1 号探测器在驱动器在驱动机构下从初始位置以 $18m/min$ 高速移动，当编码器指示到开始进入堆芯底部的位置时，驱动机构转换为低速，探测器从堆芯底部到堆芯顶部以 $3m/min$ 的低速移动，每经过 $8mm$ 测量一次中子通量密度，

以模拟量电压信号给计算机。同时，位置信号以同步电压脉冲信号给计算机；

4. 次压下“同步启动”和“序列前进”，各探测器依次进行校验测量。

组同步测量：

完成了一次校验测量后，工作方式转换开关置于“组同步”，这时4个探测器同时分别插入属于各组的十个正常通道的第一个通道，开始堆芯中子通量密度分布测量。和校验测量类似，探测器从起始位置到反应堆堆芯底部的位置之间是高速移动的，从反应堆堆芯的底部到反应堆堆芯的顶部之间是低速移动的。当4个探测器都到达各自的反应堆堆芯的顶部的时候，在同时启动反向低速移动。当探测器都回到各自的起始位置时，各组的测量程序自动转换到下一个通道进行测量。以此类推，直到扫遍38个通道为止。

完成一幅完整的堆芯中子通量密度分布图的测量，大约需要两个小时左右。测量过程是自动的。

“组序列同步”测量方式和“组同步”测量方式基本相同，不同之处是工作方式转换开关置于“组序列同步”位置后必须手动“同步启动”使4个探测器同时插入各组10个正常通道中的第一个。当4个探测器完成各自的通道测量返回到起点位置时自动停止，必须手动“程序前进”在手动“同步启动”才能把4个探测器插入下一个通道进行测量。显然这种测量方法是半自动的。

完成一幅完整的堆芯中子通量密度分布图测量可以用“组同步”测量，也可以用“组序列同步”测量。但切记在测量中子密度分布图时必须先进行校验测量。

注意：只有在泄漏检测器提供的信息为无泄漏时才允许进行各种测量。

现测量哪个通道，再测量哪个通道，可以利用程序的排列自行确定^[17]。

3.3 在线数据处理方法

在介绍完中子探测的方法后，来说明一下本文的主要工作内容：

本文研究的内容可以用一句话来说明，它是监测、计算和校正反应

堆堆芯功率三维分布的组成部分。但这部分内容涉及的相关的知识是相当多的主要包括：核反应堆的监测及仪表、核反应堆的物理理论与计算方法、核反应堆的设备结构以及计算机编程等知识。

因为探测器不是实时的在堆芯内测量的（不是这样就会对反应堆的探测仪表的损害加强，况且反应堆在稳定的工况下，堆内的功率分布有一定的稳定性，间隔一段时间进行监测堆反应堆的堆芯功率进行计算不会对反应堆的功率分布的精度有所影响）所以在每次探测时，4个探测器在各自的驱动器下对反应堆堆内的38根测管同时进行中子通量的探测，测到的数值写到相应的输入文件中，作为功率计算的输入值。在程序运行过程中，先把反应堆的几何参数（如半径、高度、燃料组件的大小等等）读到计算功率软件当中，以便在计算中选择较好的计算常数。再把探测器测得的数据读入计算软件中，然后对数据进行处理。数据处理的第一步是，检测读入的数据中有没有零点值，要是没有可以认为是好的数据，要是有点值就要进行修补。修补的方法要看零点值在探测数据中的位置而定，数据简单的处理后就要对所有的数据进行校核，这是因为38根测管使用4个探测器探测的，这样每个探测器之间可能就有有一定的差异，所以就要对这4个探测器进行统一校正，这样就可使所有的数据有统一的标准了，这是数据处理的第二步。第三步是将探测器探测的中子通量的数值转化为反应率的表示值，这一步是根据中子通量与反应率之间的数学关系可得到。这样数据处理过程基本上完成了。下一个步骤是反应堆堆芯功率计算，就是用有限个测管对反应堆的全堆芯功率的三维分布进行计算，这里的计算公式，主要是以经验公式为基础，根据测管中的反应率的数值，以及利用理论的功率分布加上权重系数对其他的没有测管的燃料组件进行功率计算。最后实现对反应堆全堆芯的三维功率分布的计算。

3.3.1 探测数据计算公式的选取

反应堆堆芯功率计算公式的选取，主要是根据论文研究的内容和研究的目而确定的。在绪论中我们简单的介绍了。

本论文最后建立的是一个用在线仿真程序计算的一个三维的堆芯功率分布的形式。形成一个 $11 \times 11 \times 16$ 的三维分布。

中子探测的方法，要用到探测器。在反应堆的内部不可能在每一

组燃料组件中都插入中子探测器，这就说明在反应堆中，要有一部分的燃料组件中不存在中子测量装置，而且是相当一部分。本文研究的反应堆堆芯是有 121 组燃料组件，其中只有 38 组燃料组件中有中子探测装置。有中子探测器的燃料组件我暂时把它定义为测管组件，这样在这 38 组有测管组件中，可以直接监测到该组件的中子通量，根据中子通量和反应率的关系就能得到该测管组件的反应率。公式如下：

$$R = \phi \times \Sigma \quad (3-6)$$

这里， ϕ 表示的是该处的中子通量；

Σ 表示的是该处的宏观裂变截面；

R 表示的是该处的裂变反应率

这就说明，只要再得到宏观裂变截面 Σ 得值，就可以计算出裂变反应率的值了。利用下面的公式：

$$P = R \times E_d \quad (3-7)$$

P 是燃料组件内单位体积释热率；

E_d 是一次裂变所放出的裂变能

这样就可以计算出该位置的功率了。每组测管组件在轴向上要监测 46 个点，这就可以使每个测管组件在轴向上的功率分布形象的表述出来了。但是要想对反应堆的整个堆芯的功率分布进行分析，那就还得要对那些没有测管的组件进行功率计算。这样才能达到对整个堆芯进行分析的目的。

如何对没有测管的燃料组件进行功率计算是本文目的能否实现的关键所在，在参阅相关书籍之后，在许多算法中，选择了下面的计算模型^[18]。

$$MP(x, y) = c \sum_{x', y'} MRR(x', y') W(x, y, x', y') \frac{PP(x, y)}{PRR(x', y')} \quad (3-8)$$

其中：

$MP(x, y)$ ：是要分析的无测管组件在 x, y 处境处理得到的功率；

C ：为归一化常数；

$MRR(x', y')$ ：测管测量的反应率；

$PP(x, y)$ ：用扩散理论计算的 (x, y) 处的功率值；

$PRR(x', y')$: 用扩散理论计算的测管处 (x', y') 的功率值;

$W(x, y, x', y')$: 权重函数

上面的式子可以看到:

1. 它是一个只考虑径向方向的计算公式, 也就是说, 对于各管的 46 个点对应好每一组燃料组件的话, 再根据这个公式进行计算, 就可以得到全堆芯的功率三维分布了也就可以对反应堆的堆芯进行功率安全分析了。
2. 最后的计算结果 $MP(x, y)$ 是一个相对的功率测量值, 它的单位应该和裂变反应率的单位是一致的, 由于裂变反应率和最后的释热率是成正比的, 所以这样的结果不会影响以后的功率分析。
3. 在此计算公式中, $MRR(x', y')$ 是从测管测出的中子通量值经过转化后得到的反应率的值, 而 $PP(x, y)$ 和 $PRR(x', y')$ 就需要用扩散理论进行计算得到的理论的功率数值。
4. 归一化常数 C 和权重系数 $W(x, y, x', y')$ 也是能够得到一个较理想的计算结果的关键数值, 所以对它们的确定也是十分关键的。

上述的公式中, 测管处的反应率 $MRR(x', y')$ 是由探测器对反应堆的中子通量的探测值经过处理转化后得到的, 某被计算的燃料组件的理论功率值 $PP(x, y)$ 和计算该燃料组件所使用的测管的理论功率值 $PRR(x', y')$ 这些数据现在都可以得到。

下面就要对功率计算公式中的权重函数 $W(x, y, x', y')$ 进行确定, 在功率计算时, 不可能把所有的测管测量的数值都用上, 只要用上周围的几个价值最高的就可以了。一要计算的组件为圆心, 以某个长度为半径, 画圆。在圆内有多少根测管, 就是几根 (这个半径有取 30 或 60 不等, 一般要看堆型和燃料的疏密程度)。在确定了对某个要计算的燃料组件功率需要的测管后, 就要对权重函数进行计算了, 对它的计算本文使用了以下的计算公式^[19]:

$$w_{K, Ji} = \frac{1/(a + bX_{K, Ji})^2}{1/(a + bX_{K, Ji})^2 + 1/(a + bX_{K, Ji+1}) + \dots} \quad (3-9)$$

X 是表示测管组件到某个燃料组件的距离,

K 表示某组被计算的燃料组件测管，

$J_{1,2\lambda}$ 表示需要用到的测管，

a, b 是两个经验常数，由经验给出他们的数值。

可以用一个简图来说明一下，如图 3.1：

这样，对权重计算就更加清晰了。

当然，任何的计算模型都有它的前提假设，在这个模型当中本文有以下几点假设：

1. 堆芯可移动探测器的输出的电信号与裂变电离室探头的裂变反应率成正比；

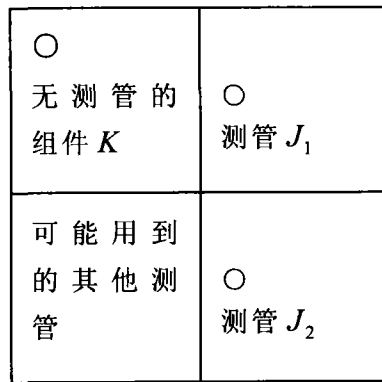


图 3.1 计算简化示意图

2. 在进行通量扫描测量期间，由于时间很短，裂变电离室中的 U^{235} 燃耗可忽略不计。
3. 对绝大多数堆芯，探头得快，热中子裂变截面之比与堆芯内的位置依赖关系较弱。
4. 探头的裂变反应率等于通量测管处的快中子通量与热中子通量的权重之和，而权重因子几乎与位置无关。
5. 因为热中子对反应堆的贡献大约为百分之八十五，测量的反应率主要是测管处的热中子通量的形状。

也可以将上面的功率计算公式（3-8）进行一下简化，这样就更好的对公式进行理解，可简化为：

$$MP = PP \times (MRR / PRR) \times W \quad (3-10)$$

上面的图 2.1 描述了本文说讲到的反应堆堆芯物理数据在线处理的简略示意图。数据从反应堆的堆芯的探测器中探测出,然后送到数据采集系统将数据输入到计算机中对所探测到的数据进行数据处理、转化和计算最后得到一个关于功率三维分布的 $11 \times 11 \times 16$ 的分布数据形式。这个结果可以认为是反应堆某一时刻的瞬时的功率三维分布,将这个结果数据输入到仿真计算系统中(一个实时计算堆芯内部理论功率的计算系统),我们把从探测器过来的功率三维分布的结果作为仿真计算系统的校核基准值,对仿真计算系统的计算结果进行校核(因为理论计算和实际的运行总是有细微上的差别的)。最后把结果放到显示系统上,便于分析数据的情况来对反应堆的内部状况进行定性或定量的分析,以判断出核电站的运行情况。

本文的主要工作内容是将用探测器探测反应堆的堆芯中子通量,并用这些数据进行在线的处理、转化和计算。

在进行反应堆堆芯探测时,数据要怎样的处理,除了探测来的堆芯数据之外是否还需要其他的相关数据,数据输入进来以后怎样进行预处理等等都需要进行详细地说明和解释。

面对这些问题,图 2.1 这样一个简单的示意图不能全部的描述出来所以用图 3.2 进行说明:

探测器在堆芯中探测的数据并不是直接就用在最后的计算程序中的,这些数据要进行一定的处理和转化后才能使用。主要的处理和转化过程有:数据零点的处理、数据的校正和校验和数据的转化,最后是数据的计算。

3.3.2 在线数据的初步处理

我们知道探测器从反应堆堆芯中将数据探测出的时候,不能直接用于使用,这种情况是这样的,由于探测器的机械原因或电子器件原因,对反应堆堆芯进行测量时,可能测到零点也就是说对反应堆的内部的某个小区域测量失灵,并且不是大区域的只是小范围的。对零点的处理可以分为两种方法:一是零点在测量测管的中间出现的;二是零点在测量测管的两端出现的。

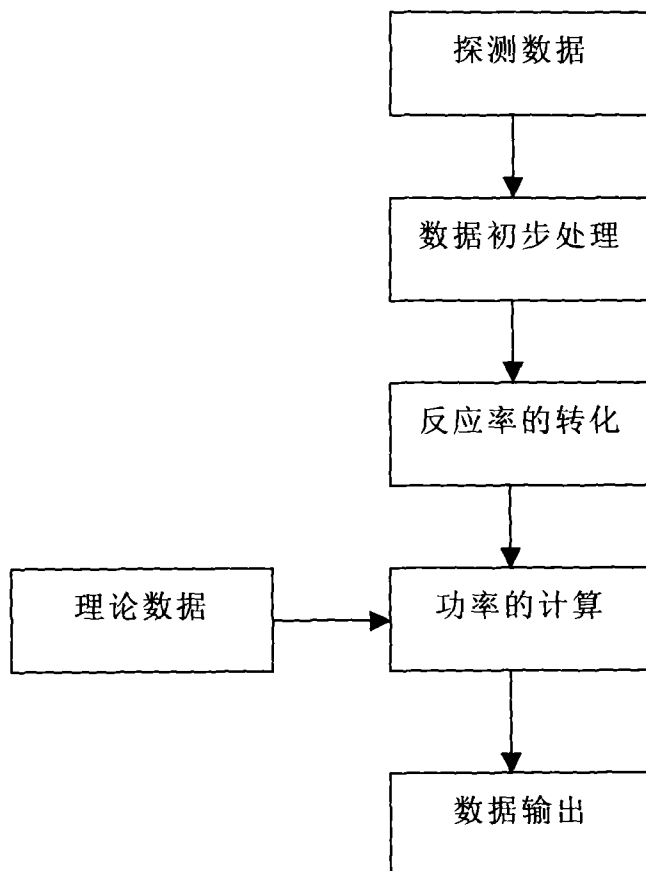


图 3.2 在线数据处理与计算

这里所研究的反应堆的测量方式是这样的，反应堆内有 121 组燃料组件，其中有 38 根测管通道，4 个探测器对其进行测量。每根测管要进行 46 个测点的测量。一般要进行 42 次以上的扫描测量（这是因为要进行校正，所以测量的次数要 4 次），在测量时，堆内的工作情况很恶劣所以就有可能有零点的出现。

下面对在测量数据的中间出现零点的处理方法，大体上就是运用取两点间直线上的点的原则：

当数据中出现连续的一个零点时，假设 $a(n)$ 为探测的数据，这里 n 是从 2 到 45 的自然数（不能使两端的端点），假设有一个 $a(n)=0$ ，则有下面的方法处理：

$$a(n) = [a(n-1) + a(n+1)] / 2 \quad (3-11)$$

当数据中出现连续的两个零点时，假设 $a(n) = a(n+1) = 0$ 则有下面的处理方法：

$$a(n) = [2a(n-1) + a(n+2)]/3 \quad (3-12)$$

$$a(n+1) = [a(n-1) + 2a(n+2)]/3 \quad (3-13)$$

当数据中有连续三个零点，假设 $a(n) = a(n+1) = a(n+2) = 0$ 则用下面的方法：

$$a(n) = [3a(n-1) + a(n+3)]/4 \quad (3-14)$$

$$a(n+1) = [2a(n-1) + 2a(n+3)]/4 \quad (3-15)$$

$$a(n+2) = [a(n-1) + 3a(n+3)]/4 \quad (3-16)$$

当发现数据中有连续的四个零点时，这是就要像系统发一个错误指令，因为这就超过了允许的误差范围了。

探测数据的零点出现在两端的端点的原因很多，一是可能出现的机械或电子设备的原因，二是与探测器在探测时的位置有关。用的方法和上面的有点类似，也是把零点的值附上直线上的点。我们也假设 $a(n)$ 为探测器探测出的数据，假设从第一个点到第 i 点，一般 i 也应该小于 4，则用下面的方法进行处理：

$a(i+1)$ 和 $a(i+2)$ 为不是零的点。

$$A = \frac{a(i+2) - a(i+1)}{(i+2) - (i+1)} \quad (3-17)$$

$$B = a(i+2) - (i+1) \times A \quad (3-18)$$

则：

$$a(1) = A \times 1 + B \quad (3-19)$$

$$a(2) = A \times 2 + B \quad (3-20)$$

.....

$$a(i) = A \times i + B \quad (3-21)$$

如果，端点的零点在探测管的另一端，则上述的方法的基本原理还是不变的，只是这里的 i 是在接近 46 的节块点附近了，这时要用到的是 $a(i-1)$ 和 $a(i-2)$ 这两个非零的数据了，然后再把上面的公式反过来用，这样就可以把端点的数据补充了。

这样，就把在反应堆堆芯探测数据中，可能遇到零点的情况分析完了，并且具体的办法也如上面的叙述的一样，遇到什么情况就用哪一种方法解决就行了。

在自然界中，不是只有在核电站附近才有放射性的，其实在大自然中的每个角落，都有放射性的东西也都有放射性的射线存在：太空射

线、 γ 射线、各种元素的同位素的放射性射线和大自然中放射性元素的反射性射线等等。什么是本底活性呢，一般来说就是在没有人为的作用时自然的放射性活度就是本底活性。在进行反应堆堆芯内部的中子通量密度测量时要测量的是燃料组件间的中子活度，所以这里面要把不相关的放射性活度去掉，这样才能保证测量的准确性，另一个原因，就是探测器内的电离室中，含有高纯度的 ^{235}U ，它的高本底活性也不可以忽略。

一般的处理方法是这样的，在探测器安装之前，就要对每个测管通道的自然放射性活度的数值要有个测量，探测器本身的本地活度的数值应该有个了解。然后在探测数据第一步完成后（零点处理），在相应的测管探测数据上减掉相应的本底活性的数值。

$$a'(n) = [a(n) - b] \times c \quad (3-22)$$

在这个式子中： $a'(n)$ 是本底活性处理后的数据；

$a(n)$ 是进行完零点处理后的数据；

b 是本底活性的数值；

c 校正因子。

这样，本底活性的干扰也可以避免了。

在本章的前几节中我们对测量原理和方法，已经有了一般性的了解，我们知道，在反应堆堆芯检测的过程中，一般要用到多个探测器，但因为每个探测器的灵敏度和其他的物理因素不尽相同，这样就要对所有的探测器要有一个校正，并且，一定要以同一个固定的探测器作为校正的基准。这样才能使得整个的探测数据有准确性。

具体的方法简单的说明如下：

假设 $a_1(1, n)$ 为第一个探测器在第一根探测通道测量的数据，就以它作为我们的基准（可以用任何一个探测器作为校正的基准，但是如果选定了那个探测器作为校正的基准那么就不能更改了）。现在让第二个探测器也通过这一根通道所探测的数据为 $a_2(1, n)$ ，这假设现在让第二个探测器来探测某一根探测通道，探测的数据为 $a_2(i, n)$ （其中 i 为某一根探测通道），则经过下面的变换，就能得到相当于第一个探测器探测一样的数据：

$$a_1'(i, n) = a_2(i, n) \times \frac{a_1(1, n)}{a_2(1, n)} \quad (3-23)$$

这样，即使在用 4 个探测器来对反应堆的堆芯进行中子通量密度

测量,但经过上面的变化,就相当于用一个探测器对反应堆的堆芯进行了全面的探测。

所以,在测量时一定要进行 42 次以上的扫描,这样才能对每个探测器进行校核。校核后就要马上把进行校核的探测数据删掉以免耽误了以后的数据转化和计算。

3.3.3 在线数据的转化

数据处理到现在还只是数据上的简单处理,数据的物理含义和单位都没有发生变化,这时的数据只是反应堆的堆芯中子通量密度的电流值,而不是本文想要的反应堆的堆芯内的反应率的数据,所以把中子通量的数据转化为反应率的数据是必须的^[20]。在反应堆工程我们知道中子通量密度与核反应堆的反应率有着一定的关系。可以通过(3-5)知道此时的反应堆的堆芯中子通量密度的具体数值。可是,要的是反应堆的堆芯反应率的三维分布。所以,还要将上面的数据进行变换处理。

$$R = \varphi \times \Sigma \quad (3-24)$$

R 是反应率;

φ 是中子通量;

Σ 是宏观裂变截面

这样,就实现了探测器的数据(即中子通量密度)向反应率的转化。

但在程序的编写时就没有这么简单,那个时候考虑到工程的方面的东西就很多了。

3.3.4 在线数据的计算

上面的数据基本上已经能被我们直接使用了,在图 3.2 上看到,我们可以直接把这些数据输入给数据计算系统,进行计算了。但是在图 3.2 上还看到了左边有一个理论数据的输入,这个理论数据的输入,我们要结合数据计算系统中使用的那个算法,见(3-8):

这里, $\sum_{x',y'} MRR(x',y')$ 就是上面的数据处理的那部分数据,现在已经基本可以直接使用了,权重因子 $W(x,y,x',y')$ 的计算方法前面已经介绍过了看公式(3-9)。

这样最后的计算结果,只要 $PP(x,y)$ 和 $PRR(x',y')$ 能够确定就可以

进行计算了。 $PP(x, y)$ 和 $PRR(x', y')$ 就是本文需要的理论数据的输入。

理论数据的计算,在第二章 2.3 节中有过详细地介绍,这里就不再叙述了。

总之,这样以来就可以将反应堆的堆芯功率的三维分布计算出来了,形式是 $11 \times 11 \times 16$ 的直接送给实时的仿真程序中校核仿真计算程序中计算的理论堆芯物理参数了。

3.4 本章小结

本章介绍测量的基本知识,监测的基本方法。

主要有监测的对象:

这里有带电粒子、 X 和 γ 射线和中子的探测。

不同的粒子应该采用不同的测量原理和不同的测量工具。

主要对堆芯中子通量测量原理进行了地介绍。

首先是中子通量密度测量的功能。

然后,是对堆芯中子通量密度测量系统的组成和布局进行了描述,主要介绍了,我国的几个电站的堆芯中子通量密度测量系统的组成和布局,特别对秦山核电站二期的反应堆的堆芯结构、堆芯的几何参数以及探测器等进行说明。

堆芯内中子探测的主要部件中:中子探测器。

再就是对堆芯中子测量系统的工作方法进行了描述:堆芯中子测量系统通常的工作方式。

由于本底活性的存在会对探测的数据有干扰,所以必须去掉本底活性,如果没有这一步,那么所有的一切都是不准确的,也就没有任何意义而言了。

上面是对测量的方法的简单说明。

本章的后半部分就是针对本论文的工作内容和工作的实际情况进行的在线数据分析。

在线数据的处理方法主要来说是应该分三步:

1. 在线数据的初步处理,这里包括数据中出现零点时的处理、本底活性的处理以及测量数据的校验处理。
2. 在线数据的转化,这里就要把中子通量的电流信号(mA)转化为相对的反应率数据。

3. 数据的转化，这里就要把中子通量的电流信号 (mA) 转化为相对的反应率数据。

第 4 章 程序的编写调试以及结果分析

本文最后要建立的是一个在线数据处理的软件。运用的是 V-FORTRAN 语言编写在线数据处理程序的。前面, 进行对数据的在线处理的方法和模型基本上确定, 下面就是要针对前面研究过的内容进行编程和结果分析。

4.1 编程环境与接口

本文的编程环境是 V-FORTRAN, 在 V-FORTRAN 编写的在线数据处理程序的, FORTRAN 作为第一种高级编程语言虽然已经很古老了, 但是它的计算功能却是很好的, 易编写, 也很容易让别人看懂。

本文是反应堆堆芯物理在线仿真的一部分, 在线仿真的那部分是在一个在线仿真平台 ASCA 上进行的。ASCA 是亚洲仿真公司开发的高级仿真支撑软件, 是一个完整的支持实时仿真软件开发、调试和执行的软件工具。

在工作时, 在线仿真程序在 ASCA 上实时的对反应堆的功率进行计算, 当有探测数据在线的传出时, 就输入到本文所编写的在线探测数据处理程序中, 进行计算, 得到实际的反应堆功率数据, 再把这些数据通过一定的通讯协议传递给在线实时仿真程序中, 对那里的数据进行校核。

4.2 在线数据处理程序的结构

在本文的仿真程序编写之前, 要对本文的程序运行的结构有所了解。仿真程序的结构与第三章我们讲述的数据分析过程是一致的, 如图 4.1 所示:

如图 4.1 所示在程序设计时, 整个计算程序复杂流程按一定的功能化分成若干具有简单功能的小模块, 一个模块对应完成一个相应的子功能, 各模块之间通过良好的组织关系层层调用, 并且通过共享数据库来实现整个程序的完整功能以及数据运算的。

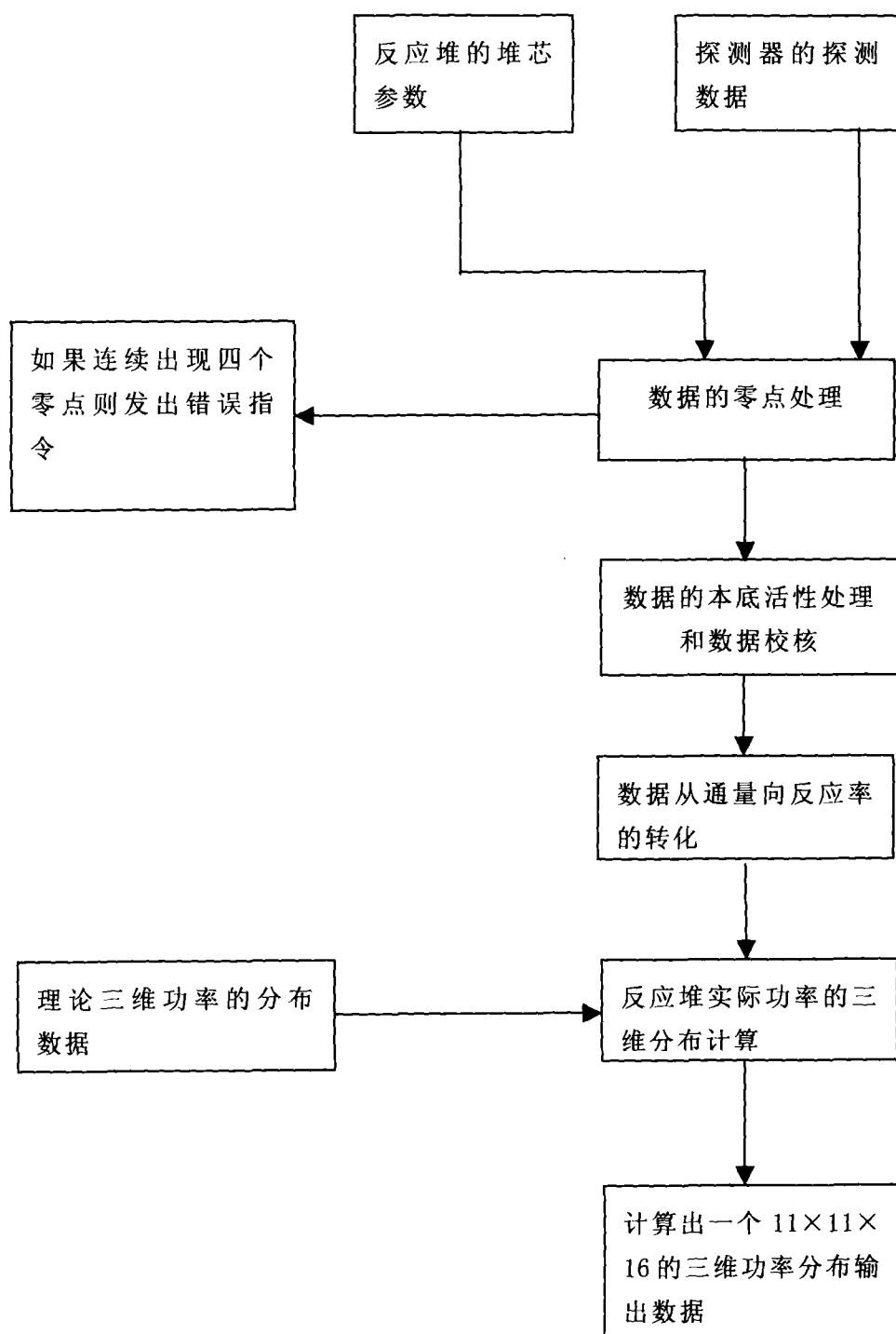


图 4.1 在线数据处理示意图

4.3 程序的编写

在程序编写的过程中, 本文参考了离线数据处理程序 DXCL-PC3。DXCL-PC3 是使用可移动的裂变电离室测量的中子通量, 结合功率与通量比值的理论计算数据, 得到功率分布。然后用推测出的功率分布确定最大比功率、功率倾斜、轴向偏移、局部燃耗率等等。此外, 它还可以将堆内热电偶测量结果和功率分布进行比较, 以便观察冷却剂的流动特性。此程序可做二次侧的量热计分析。还可以做功率计算, 根据相对堆芯功率, 应用输入的 $W(z)$ 因子, 计算出每个轴向区段的 F_q 裕量。DXCL-PC3 还可以有很多其他的重要的功能, 这里不一一列举了^[22]。本文编写的程序虽然有一部分是参考了 DXCL-PC3 来编写的, 其中还有一些编程的方法也作了些参考, 可是本文的程序与 DXCL-PC3 有着很大的不同, 首先 DXCL-PC3 是进行离线监测时所使用的计算程序, 而本文的编写软件是在线实时仿真的计算程序。另外, 在程序的内部本文也只是借鉴了 DXCL-PC3 的某些处理数据的方法, 在本文中也作了一些改进, 使它能够满足本文研究的要求。

下面着重介绍几个重要的在线数据处理手段和计算方法的编写过程。

4.4. 在线数据处理的编程实现

在数据中间出现零点时, 要根据出现几个零点来分别进行处理: 程序可以这样编写:

```
DO 9 NN=2, 45
  IF (ACT(NN).NE.DZERO) GO TO 9
  IF (ACT(NN+1).NE.DZERO) GO TO 3
  IF ((NN+2).GT.NPTS) GO TO 3
  IF (ACT(NN+2).NE.DZERO) GO TO 4
  IF ((NN+3).GT.NPTS) GO TO 4
  IF (ACT(NN+3).NE.DZERO) GO TO 5
GO TO 150
```

```

3  CONTINUE
   ACT(NN)=(ACT(NN-1)+ACT(NN+1))/2.0D0
   GO TO 9
4  CONTINUE
   ACT(NN)=(2.0D0*ACT(NN-1)+ACT(NN+2))/3.0D0
   ACT(NN+1)=(ACT(NN-1)+2.0D0*ACT(NN+2))/3.0D0
   GO TO 9
5  CONTINUE
   ACT(NN)=(3.0D0*ACT(NN-1)+ACT(NN+3))/4.0D0
   ACT(NN+1)=(2.0D0*ACT(NN-1)+2.0D0*ACT(NN+3))/4.0D0
   ACT(NN+2)=(ACT(NN-1)+3.0D0*ACT(NN+3))/4.0D0
9   CONTINUE
   GO TO 91
150 CONTINUE
    IF( IERROR .EQ. 0 ) THEN
        CALL ERROR( 1 )
    
```

这样就分出了，一个零点到 3 处理，两个零点到 4，三个零点到 5 处理。如果没有零点则程序跳到 91 处继续计算，如果存在四个连续的零点，则程序跳到 150 并且发出一条错误的指令。

零点数据在两段出现时，这段程序的编写，主要是将进行补点的直线的斜率和垂足计算出来即可，因为每根测管的数据都不会相同，所以，要有一个通用的计算斜率和垂足的子程序是最为合适的，下面是子程序的主要编写部分：

```

X1 = FLOAT(K1)
X2 = FLOAT(K2)
A= (Y2-Y1) / (X2-X1)
B= Y1 - (X1 / (X2-X1)) * (Y2-Y1)
    
```

这里的 X_1, Y_1, X_2, Y_2 就是探测器探测数据中的点和数值， X 代表某根测管的第几个点， Y 表示这个点上的测量数据。这样需要时只要调用这个子程序就可以了。

在本底活性的处理中是先将 4 个探测器的本底活性测量出来（也是电流值），在在线数据进行零点处理后减去相应的本底活性的数值，这就除去了本底活性的干扰。数据的删减和校核是同时进行的，在程序的运行中，如果两次扫描的测管是同一根即两个探测器探测同一根探测通道，则以基准的探测器探测的数据为标准计算出两个探测器的比例系数，作为另一个非基准探测器探测其他通道的数据转换的比例系数。然后再把两次探测的这根测管的非基准探测数据删掉。这样就实现了在线数据的校核和数据的删除。

数据转化，探测电流信号与中子通量之间存在着比例关系，中子通量和反应率之间也存在着比例关系，这样就可以用一个总的比例系数来完成探测数据到反应率之间的转化，再把反应率的数值用公式(3-8)就可以计算出反应堆的全堆芯功率分布了。

4.5 程序的调试

本程序在参考 DXCL-PC3 时作了调整，主要是计算对象的转换，DXCL-PC3 主要是针对秦山一期的反应堆的堆型，一期的反应堆堆内有 121 组燃料组件，30 根测管，中子探测器 3 个，扫描 32 次，而秦山二期的反应堆的堆型是 121 组燃料组件（组件的尺寸变大了），38 根测管，中子探测器 4 个，扫描 42 次。在这种情况下，就遇到了一些困难，首先，输入文件就不一样了，因为反应堆堆芯的参数变化，输入数据同样要变化，其次就是计算公式的合理性，在公式（3-8）中，有一个权重函数在计算中很重要，在公式（3-9）中可以看到在确定权重函数时有两个经验常数 a, b ，这更换计算对象后这两个常数能否合理也是困难。这就需要在程序调通后的输出数据，通过分析输出数据来确定模型的合理性和公式（3-8）中权重函数的合理性。

4.6 在线数据处理结果分析

本程序在运行时，需要有理论数据输入文件、反应堆堆芯物理参数输入文件和探测器的数据输入文件，这样才能运行。最后有三个文件的输出，一是，探测器的探测数据经过一系列处理过程后转化为反应率的数据输出，二是，计算后形成的 $11 \times 11 \times 46$ 的堆芯功率分布数据，三

是 $11 \times 11 \times 16$ 的最后的反应堆堆芯功率分布数据。在线数据处理程序调试完成后,对其结果进行分析。这也是本文最后是否合理的重要依据。

4.6.1 在线数据的来源

此程序在运行时, 需要有三个数据的输入:

- 1. 反应堆的堆芯参数
- 2. 反应堆的理论数据
- 3. 探测器的探测数据

只要有了这三个数据该程序才能正常的工作, 反应堆的堆芯参数是从秦山电站获得的数据, 其中包括燃料组件的数目, 测管的数目, 堆内的轴向点的数目、燃料组件在堆芯的位置、探测时扫描的次数、宏观裂变界面的数值、驱动器的数目以及本底活性的数值等等的反应堆的堆芯内部的物理参数。

反应堆的理论数据, 这部分是由实时理论计算出来的, 根据中子扩散方程和计算数学的差分方程的方法计算的。

探测器的探测数据, 这部分数据也是从秦山电站获得的。

下面本文就简单的列举一下这 3 个输入文件:

反应堆的堆芯参数数据:

[1994-10-07]Qinshan Nuclear Power Plant 1

42 46 0 4 1 0 1 0 4 121 38

这表示扫描 42 次, 轴向上有 46 个点, 4 个探测器, 121 根燃料组件, 38 根测管。

| | | | | |
|----------------|---|---|--------------|------|
| 1 | H | 1 | 0.268206E+00 | 204. |
| -16.104 96.623 | | | | |
| 2 | G | 1 | 0.344297E+00 | 204. |
| 0.000 96.623 | | | | |
| 3 | F | 1 | 0.268206E+00 | 204. |
| 16.104 96.623 | | | | |
| 4 | K | 2 | 0.286416E+00 | 204. |
| -48.312 80.519 | | | | |

| | | | | |
|---------|--------|---|--------------|------|
| 5 | J | 2 | 0.429399E+00 | 204. |
| -32.208 | 80.519 | | | |
| 6 | H | 2 | 0.531569E+00 | 204. |
| -16.104 | 80.519 | | | |
| 7 | G | 2 | 0.572211E+00 | 204. |
| 0.000 | 80.519 | | | |
| 8 | F | 2 | 0.531569E+00 | 204. |
| 16.104 | 80.519 | | | |
| 9 | E | 2 | 0.429399E+00 | 204. |
| 32.208 | 80.519 | | | |
| 10 | D | 2 | 0.286416E+00 | 204. |
| 48.312 | 80.519 | | | |
| 11 | L | 3 | 0.330016E+00 | 204. |
| -64.415 | 64.415 | | | |

.....

上面的数据表示，第几根燃料组件的编号，第二个数是它的字母坐标第三个数是数字坐标，第四个数的是正比于几何区间的功率的输出数，第五个数是每根燃料组件内部有 204 根燃料棒，第六和第七个数是燃料组件的实际坐标。上面只列举了 121 根中的 11 根燃料组件的参数。还有测管的位置和坐标

| | | | |
|---|-----|--------|---------|
| 1 | D 3 | 48.312 | 64.415 |
| 2 | F 8 | 16.104 | -16.104 |
| 3 | F 3 | 48.312 | 64.415 |
| 4 | G11 | 0.000 | -64.415 |
| 5 | G13 | 0.000 | -96.623 |

.....

上面是 38 根测管中的 5 根。
反应堆的理论数据,这部分数据也可以是从仿真程序上得到。
主要就是每根燃料组件的理论功率值:

0.1455 0.2988 0.4566 0.5764 0.6830 0.7438 0.8127 0.8412

0.8753 0.8729 0.8443 0.7781 0.6472 0.4569 0.2095 0.0125
 0.1687 0.3448 0.5283 0.6681 0.7983 0.8722 0.9514 0.9863
 1.0236 1.0233 0.9977 0.9231 0.7715 0.5485 0.2546 0.0154
 0.1451 0.2934 0.4407 0.5564 0.6692 0.7318 0.797 0.8211
 0.8457 0.8382 0.8138 0.7503 0.6267 0.4418 0.2009 0.0113
 0.1317 0.2667 0.399 0.4974 0.5894 0.6489 0.7069 0.7317
 0.7478 0.7437 0.7149 0.6635 0.5515 0.3958 0.1916 0.0156
 0.1759 0.3575 0.5379 0.6715 0.7992 0.8777 0.9615 0.9943
 1.0207 1.0117 0.9776 0.9026 0.7503 0.5314 0.2507 0.0161
 0.2215 0.4852 0.7615 0.9715 1.1609 1.2683 1.3818 1.4375
 1.5004 1.4933 1.4478 1.339 1.1174 0.7966 0.3652 0.0206
 0.252 0.5343 0.9061 1.1773 1.4012 1.5300 1.661 1.7176
 1.7787 1.7651 1.7033 1.5651 1.2958 0.9143 0.4129 0.0231
 0.2225 0.4874 0.7649 0.9759 1.1663 1.2741 1.3882 1.4441
 1.5073 1.5001 1.4545 1.3452 1.1225 0.8002 0.3669 0.0207
 0.1762 0.3582 0.539 0.6728 0.8008 0.8794 0.9634 0.9962
 1.0227 1.0136 0.9795 0.9044 0.7518 0.5324 0.2511 0.0161
 0.1366 0.2747 0.4087 0.5071 0.5992 0.654 0.705 0.7272
 0.7494 0.7449 0.7196 0.6642 0.5516 0.3903 0.1842 0.0123
 0.1570 0.3142 0.4663 0.5783 0.6849 0.7516 0.8178 0.8445
 0.8639 0.8621 0.8316 0.7713 0.6395 0.454 0.2171 0.0164

上面也是只列举了 11 根燃料组件的理论功率分布数据，可以看到每根燃料组件上有 16 个轴向节块，每个数代表了这个节块里的平均功率值。

探测器的探测数据：

主要是每根探测通道的测量的数据，另外还有每根管的裂变界面和本底活性。

1 1 1 4 .50 .897 1.0000 0
 98.82500 103.02000 137.65000 173.75000 206.96000 237.21000

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 256.83000 | 290.93000 | 323.25000 | 347.77000 | 370.21000 | 391.46000 |
| 409.63000 | 425.27000 | 431.43000 | 438.72000 | 468.22000 | 486.01000 |
| 503.03000 | 513.74500 | 511.97000 | 536.67000 | 545.18500 | 548.05500 |
| 540.96500 | 550.68000 | 557.23000 | 558.88500 | 553.97500 | 539.33000 |
| 557.93000 | 557.37000 | 554.40000 | 547.43000 | 538.20000 | 526.12000 |
| 506.98000 | 471.43000 | 475.78000 | 459.02000 | 435.38000 | 407.16000 |
| 373.27000 | 333.38000 | 287.88000 | 236.76000 | | |
| 2 | 4 | 2 | 11.50 | .867 | .9953 0 |
| 67.98700 | 73.97500 | 100.33000 | 126.95000 | 151.45000 | 173.50000 |
| 187.61000 | 212.97000 | 235.87000 | 253.38000 | 269.83000 | 284.91000 |
| 297.72000 | 308.17000 | 312.60000 | 318.58000 | 340.41000 | 353.98000 |
| 367.56500 | 376.00000 | 375.02000 | 391.44500 | 396.77500 | 399.16500 |
| 394.17000 | 404.77500 | 413.35500 | 415.40500 | 406.50000 | 395.05000 |
| 408.37000 | 407.68000 | 405.58000 | 401.55000 | 396.28000 | 387.21000 |
| 371.92000 | 344.41000 | 347.08000 | 332.01000 | 312.45000 | 290.20000 |
| 265.37000 | 236.78000 | 204.62000 | 168.33000 | | |
| 3 | 5 | 1 | 12.50 | .873 | .9979 0 |
| 95.28700 | 110.16000 | 146.46000 | 182.16000 | 215.90000 | 245.23000 |
| 263.53000 | 301.80000 | 331.53000 | 355.38000 | 378.61000 | 399.71000 |
| 418.43000 | 432.47000 | 431.67000 | 448.13000 | 473.53000 | 488.71500 |
| 505.05500 | 514.77000 | 517.78000 | 540.92000 | 550.19000 | 553.49000 |
| 541.91500 | 558.97500 | 563.09000 | 561.07000 | 551.30500 | 548.61000 |
| 564.70000 | 563.02000 | 556.16000 | 546.21000 | 534.80000 | 522.61000 |
| 500.10000 | 471.88000 | 473.18000 | 451.70000 | 425.80000 | 394.60000 |
| 358.50000 | 318.35000 | 274.01000 | 223.65000 | | |
| 4 | 6 | 1 | 13.50 | .866 | .9982 0 |
| 70.07500 | 71.80000 | 97.08700 | 123.25000 | 147.32000 | 169.68000 |
| 184.28000 | 207.86000 | 231.93000 | 250.61000 | 267.18000 | 282.46000 |
| 295.53000 | 306.55000 | 312.12000 | 314.52000 | 337.10000 | 349.96500 |
| 362.85000 | 371.78500 | 370.22000 | 390.05000 | 396.23500 | 398.11000 |

392.33500 400.68000 409.76000 410.66500 404.73000 389.16000
402.53000 400.07000 395.98000 392.26000 389.26000 383.56000
370.71000 342.60000 345.73000 334.40000 317.16000 296.22000
270.96000 242.12000 209.06000 172.38000

.....

上面给出的就是探测器的探测数据，第一行 第一个数表示第几次扫描，第二个数是这次扫描的 Pass 号，第三个数是第几个探测器，第四个数是第几根测管，第五个是本底活性第六个和第七个是快热中子裂变截面。上面给出的也是部分数据。这些就是输入数据的来源。

下面就对程序运行的结果进行分析：本程序的结果一共是由三个输出文件，我们就对这三个输出文件进行分析。

4.6.2 在线数据的数据转化的结果分析

探测器的探测数据，经过简单处理后就要进行数据校核和数据转化，这可以说是这个程序的第一步重要计算，计算的准确程度对以后的步骤有着非常重要的作用。我们来校核后数据转化所得到的结果：

1

.20052E+00.20763E+00.28148E+00.35713E+00.42767E+00.49325E+00
.53464E+00.60465E+00.67534E+00.72917E+00.77739E+00.82130E+00
.85790E+00.89128E+00.90507E+00.91275E+00.97768E+00.10153E+01
.10522E+01.10791E+01.10765E+01.11338E+01.11514E+01.11581E+01
.11400E+01.11654E+01.11886E+01.11915E+01.11727E+01.11309E+01
.11685E+01.11631E+01.11522E+01.11413E+01.11303E+01.11127E+01
.10741E+01.99366E+00.10031E+01.96979E+00.91962E+00.85735E+00
.78237E+00.69887E+00.60226E+00.49574E+00

2

.31219E+00.35868E+00.47882E+00.60000E+00.71514E+00.81720E+00
.88297E+00.99534E+00.10993E+01.11778E+01.12488E+01.13140E+01
.13732E+01.14203E+01.14353E+01.14595E+01.15460E+01.16022E+01
.16559E+01.16859E+01.16811E+01.17554E+01.17761E+01.17829E+01

.17533E+01.17923E+01.18179E+01.18141E+01.17819E+01.17394E+01
 .17888E+01.17768E+01.17614E+01.17439E+01.17177E+01.16843E+01
 .16227E+01.15126E+01.15180E+01.14559E+01.13725E+01.12793E+01
 .11733E+01.10500E+01.90748E+00.74537E+00

3

.16688E+00.19529E+00.26576E+00.33757E+00.40755E+00.47577E+00
 .52239E+00.60817E+00.69246E+00.76661E+00.83668E+00.90206E+00
 .95981E+00.10062E+01.10250E+01.10520E+01.11278E+01.11738E+01
 .12192E+01.12495E+01.12468E+01.13136E+01.13297E+01.13373E+01
 .13172E+01.13598E+01.13850E+01.13880E+01.13576E+01.13231E+01
 .13662E+01.13653E+01.13526E+01.13375E+01.13161E+01.12854E+01
 .12319E+01.11475E+01.11561E+01.11099E+01.10464E+01.96922E+00
 .88303E+00.78288E+00.67115E+00.54763E+00

.....

这里只拿出了三组进行观察，因为探测器的探测数据是中子通量密度的电流号表现的数值，它与中子通量密度成正比，中子通量密度与反应率也成正比，这样只要找同一个的测管的数据进行比较就可以知道。

下面找到第一根管的探测数据，这是因为第一根测管的位置是在反应堆的外侧（特殊位置要是满足，其他的位置是没问题的）它的坐标是 D 3

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 68.52500 | 71.65000 | 96.76200 | 122.23000 | 146.30000 | 168.70000 |
| 182.35000 | 206.55000 | 230.72000 | 248.78000 | 265.12000 | 279.81000 |
| 291.72000 | 303.48000 | 307.33000 | 310.17000 | 331.90000 | 344.68000 |
| 357.04000 | 366.46000 | 366.21000 | 385.51000 | 391.34000 | 394.01000 |
| 387.45000 | 396.43500 | 403.17500 | 404.24500 | 397.38500 | 384.38000 |
| 396.70000 | 395.51000 | 392.13000 | 388.38000 | 383.93000 | 377.61000 |
| 364.11000 | 337.31000 | 340.65000 | 329.22000 | 312.22000 | 290.66000 |
| 264.75000 | 236.60000 | 203.73000 | 167.71000 | | |

我们在从输出文件中找到 D 3 这根探测管的反应率的数据：

. 20052E+00. 20763E+00. 28148E+00. 35713E+00. 42767E+00. 49325E+00
 . 53464E+00. 60465E+00. 67534E+00. 72917E+00. 77739E+00. 82130E+00
 . 85790E+00. 89128E+00. 90507E+00. 91275E+00. 97768E+00. 10153E+01
 . 10522E+01. 10791E+01. 10765E+01. 11338E+01. 11514E+01. 11581E+01
 . 11400E+01. 11654E+01. 11886E+01. 11915E+01. 11727E+01. 11309E+01
 . 11685E+01. 11631E+01. 11522E+01. 11413E+01. 11303E+01. 11127E+01
 . 10741E+01. 99366E+00. 10031E+01. 96979E+00. 91962E+00. 85735E+00
 . 78237E+00. 69887E+00. 60226E+00. 49574E+00

下面我们用 excel 进行画图比较：

可以看到图 4.2 的图形，横坐标是探测管道的轴向的 46 个点，纵坐标是探测器的探测数据。根据坐标点划出的图形，可以看到数据的两端呈上升趋势，中间呈与横坐标平行的趋势，基本上满足圆柱形反应堆的中子通量密度的理论分布。

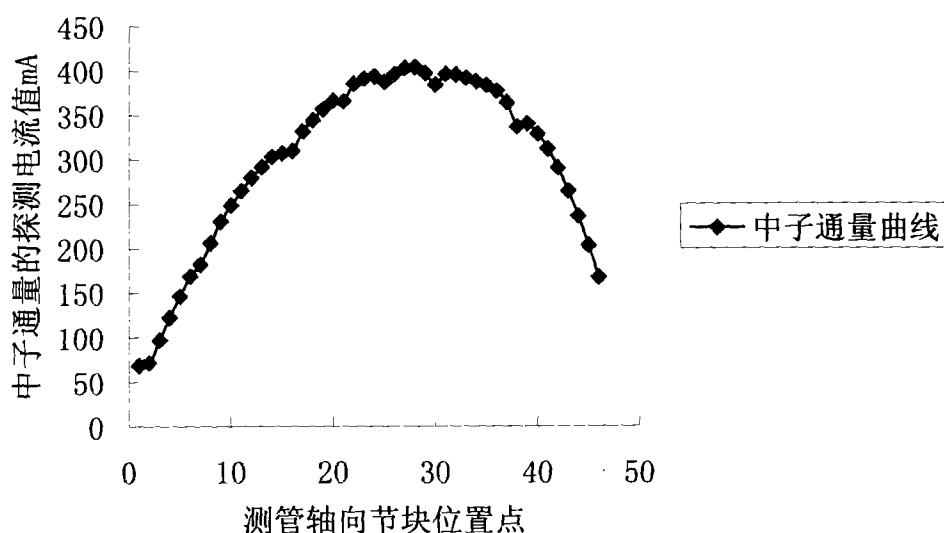


图 4.2 D 3 测管的探测数据图

下面看一下这根探测测管数据在进行完数据转化后的结果

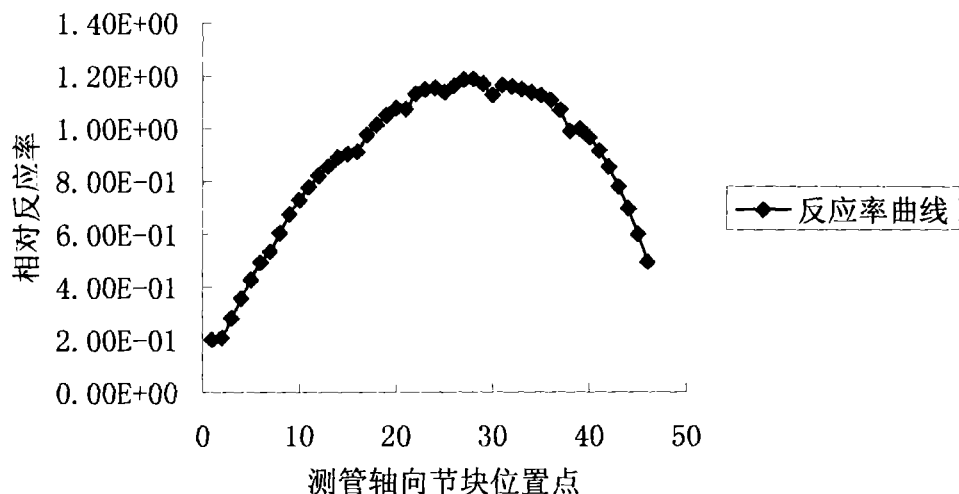


图 4.3 D 3 测管数据转化成反应率的数据

这是 D 3 测管数据在进行数据转化后转变为反应率后的坐标图。

我们看到它的两端的数据的走势都是向上发展的，而中间的部分则是平缓的几乎与横轴平行的。

再来对比一下图 4.2 和图 4.3 这两幅坐标图，就会发现这两幅图，如果不考虑到坐标的数值，他们这两组曲线可以说是很相似的，但也有些不同，我们来进一步的分析一下。

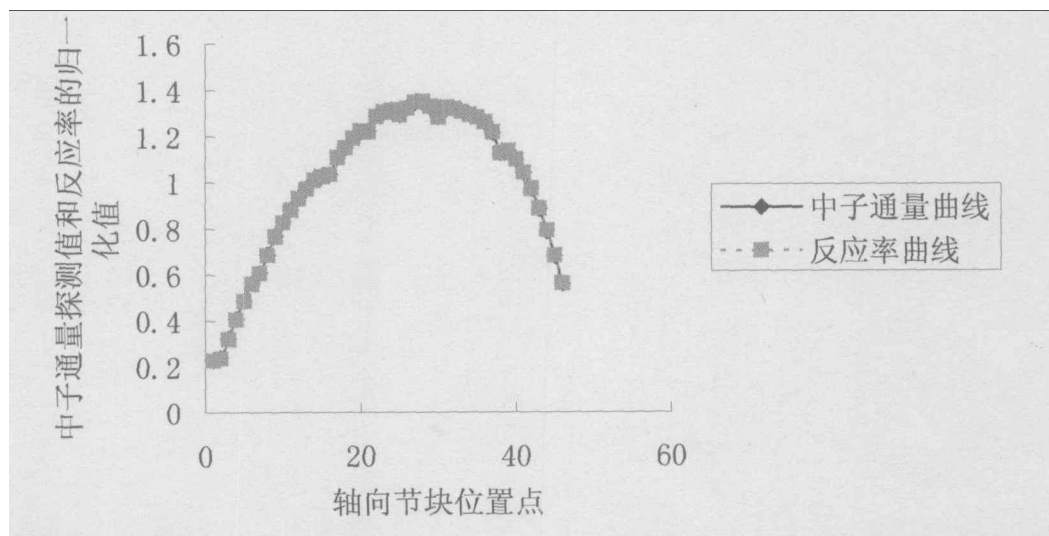


图 4.4 D 3 测管探测数据与反应率的归一化比较

为了对不同的纵坐标下的结果进行分析，采用归一化的方法来对这两个图形进行比较。

在这个图上，可以看到两条线基本上是吻合的在右上方有稍微的不同，这个结果可以说是满足本文的要求的。

为了有可信性，就在从这些数据中任意找出第二根测管再来比较一下。看看是否会有上面同样的结论，第二根测管是在反应堆的靠近中心的位置，它的坐标是 F 8, 如果有同样的结论这说明我们的方法和程序的便携式正确的。下面是 F 8 根管的探测数据和转化数据的比较：

还是像上面一样，要进行数据的分析，但为了方便起见只给出最后的归一化的图：

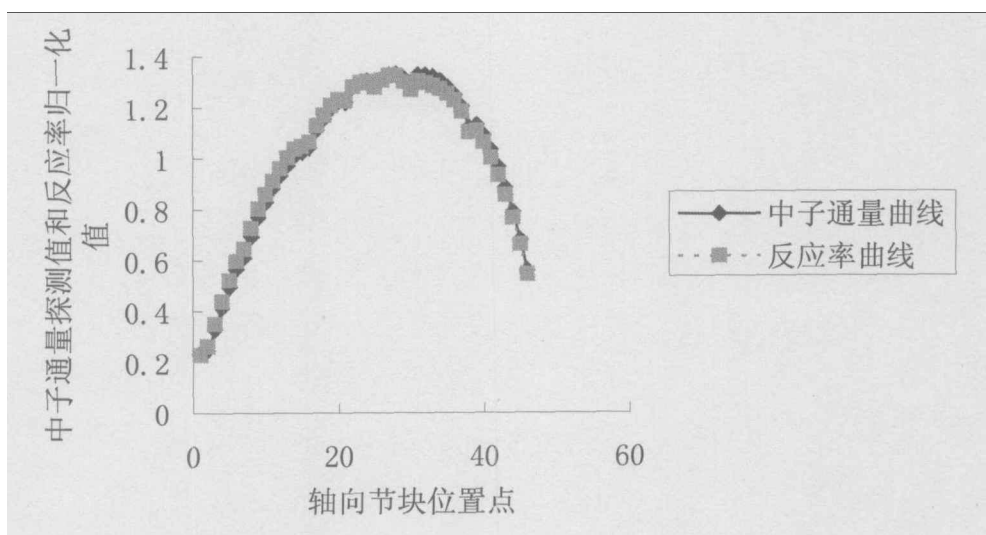


图 4.5 F 8 测管探测数据与反应率的归一化比较

可以看到这两幅图的情况和前面说的两幅图的情况基本类似，所以说用这种方法，来进行数据的转化和数据的处理是可行的也是可信的。

4.6.3 功率输出结果的分析

我们知道，前面的数据经过数据转换不是最终的目的，最后的结果是要将反应堆的堆芯功率的三维分布数据计算出来。下面就要对本程序的功率计算结果进行分析一下。

在进行计算之前，先要注意一个问题，当本程序读入输入数据时，要对反应堆的理论功率数据进行输入。我们知道反应堆的理论数据在读入时的格式是 $11 \times 11 \times 16$ ，然而反应率的数据是一个轴向上是由 46 个点的数据，如果要用前面说到的公式 (3-8)

这时，进行计算就要进行径向上的点对点的计算，这就是说探测数据的轴向上的 46 个点和理论数据上的 16 个点是不可能进行计算的。所以我们要进行计算之前先要解决这问题。

问题的解决方法：我们知道在反应堆的堆芯功率的理论分布状态，所以就把理论的这 16 个节块扩展成 46 个节块，程序是这样实现的：

```

do 999 i=1,121
  READ(70,1002) (pppower(i,N),N =1,16)
1002 FORMAT (10F7.4)
999  CONTINUE
  do 1006 j=1,121
    ppower(j,1)=pppower(j,1)
    ppower(j,2)=pppower(j,1)
    do 1005 i=2,15
      ppower(j,3*(i-1))=pppower(j,i)
      ppower(j,3*(i-1)+1)=pppower(j,i)
      ppower(j,3*(i-1)+2)=pppower(j,i)
1005 continue
    ppower(j,45)=pppower(j,16)
    ppower(j,46)=pppower(j,16)
1006 continue

```

上面的程序段就实现了，一面把数据从输入文件中读入，又将 16 节块的平均功率扩展为 46 个节块的平均功率。有了这样的数据后我们的程序就可以运行计算了。下面就是程序运行的结果。下面还是对 D 3 测管的数据，以这样是便于观察。

0.13963 0.15583 0.20989 0.26569 0.31861 0.36263 0.39362 0.45110

0.49733 0.53885 0.57768 0.60933 0.64126 0.66740 0.67293 0.68783
0.73335 0.75957 0.78750 0.80573 0.80445 0.84399 0.85523 0.85760
0.84280 0.86517 0.87834 0.87926 0.86276 0.84061 0.86662 0.86454
0.85470 0.84485 0.83141 0.80803 0.77678 0.72456 0.72388 0.69541
0.65678 0.61191 0.55853 0.49668 0.42771 0.34990

上面就是运行程序得到的数据，还是用 Excel 进行列表然后画图得到：

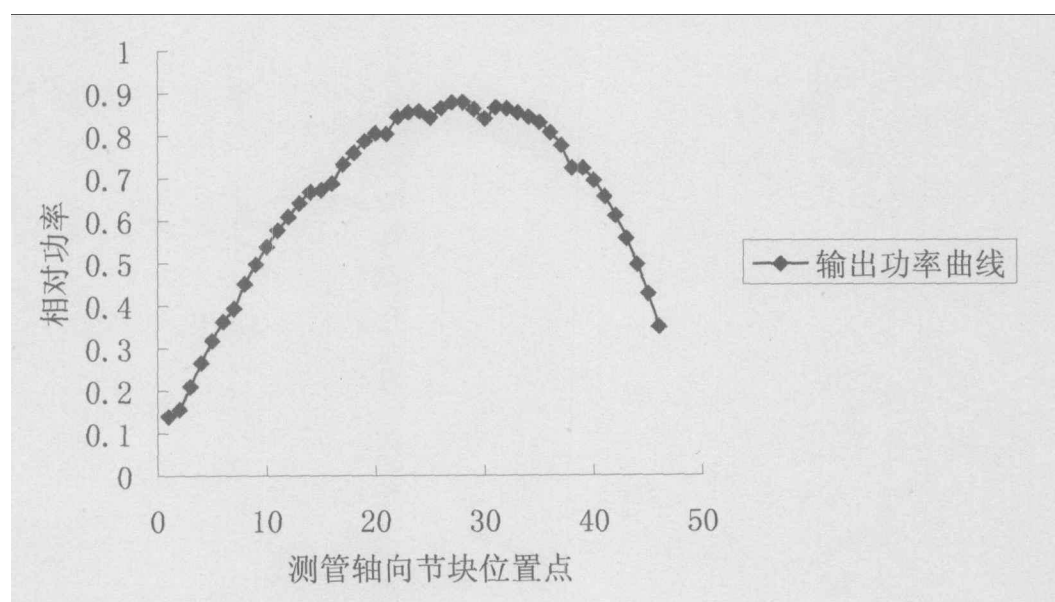


图 4.6 D 3 测管的输出功率数据

我们看到，此图形和图 4.2 和图 4.3 都有大概成相似的图像特征。

图像的大致走势相同，而且在函数的比较平缓的区域上都有五个极小值，这是因为我们知道反应堆的燃料组件中有隔架的原因，可以说基本上已经描述了反应堆堆芯内部的功率的轴向的变化。

但现在还没有完成计算，因为计算结果最后是要对理论计算的数据进行校核的，所以还要将轴向为 46 个节块的平均功率值的数据在转化为轴向为 16 个节块点的平均功率的数据。这是采用的是覆盖区平均值的方法。也就是要把这 46 个点平均分成 16 个点，46 除以 16 时得不到整数的，这样就从第一个点开始看这 16 的点每个点覆盖到那个点我们就把那几个点加和，然后再除以所覆盖的点数，这样去平均值。

这样，我们就有了下面的输出结果：

0.16845 0.25174 0.42617 0.55580 0.64635 0.71342 0.78931 0.83456
0.85519 0.87138 0.85863 0.84888 0.78520 0.70016 0.58097 0.42476

把这些点用 Excel 进行列表然后画图得到：

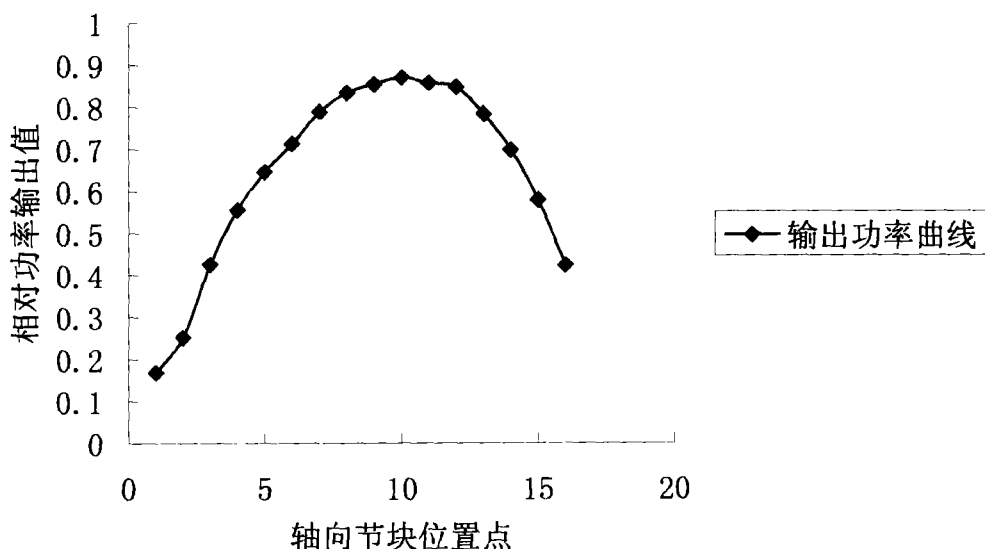


图 4.7 D 3 测管的最后计算功率输出值

这个图和图 4.6 类似只是在这里图形变得更加平滑这是因为分区的点比上一个图表要少而形成的。

在把这根测管理论功率数据列出我们来对比一下，

0.269005 0.468639 0.653216 0.813904 0.947607 1.035080 1.103460
1.158780 1.200160 1.230260 1.246150 1.236850 1.183650 1.061200
0.837584 0.507146

这就是 D 3 测管理论功率数据。它的图表示图 4.8：

看到反应率数据划出的图表，但是还是没有方法直接的观察结果的准确性，所以还是要进行归一化，然后再看他们的对比，看图 4.9

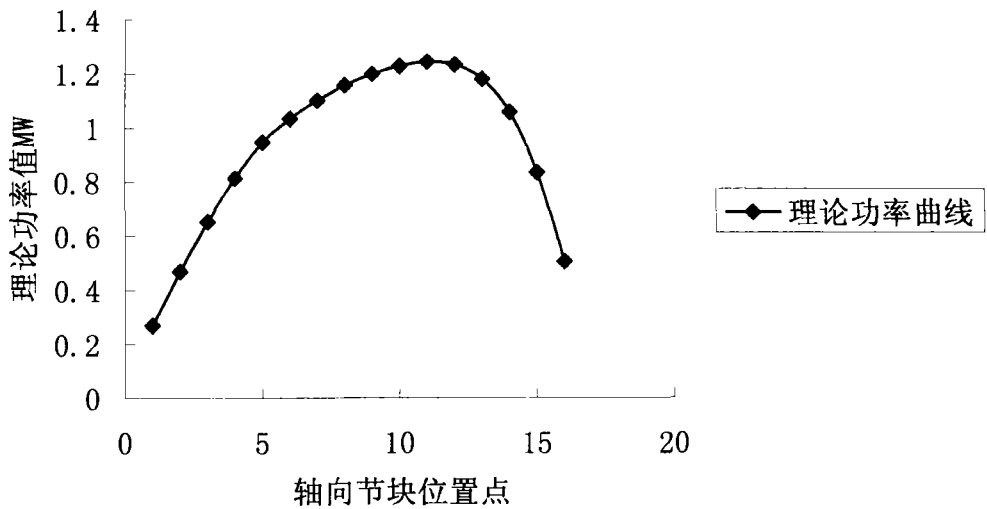


图 4.8 D 3 测管理论功率数据

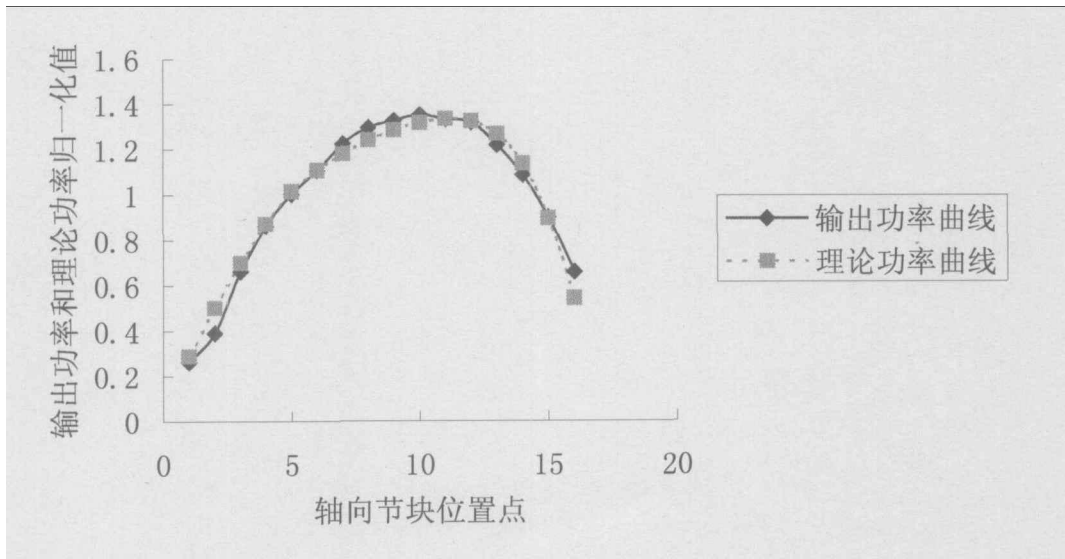


图 4.9 D 3 测管理论功率和实际功率的归一化对比

在图 4.9 中，可以清楚地看到两条曲线大致的走向是相同的，起点的位置，极点的位置等等都是很相似的，但也有很多不同之处，这就是进行了实际计算的结果，这个结论还是可信的。

为了不让数据有偶然性，将再取出一组测管数据进行对比。我们取反应堆的中心的燃料组件数据进行对比：

这根测管是第 61 根管，作表示 G 7

图 4.10 G 7 管的输出功率数据；

图 4.11 G 7 管的理论功率数据；

图 4.12 G 7 管归一化对比。

本文把他们集中放到一起，这样也便于我们对结果的形象地分析和直观地观察。

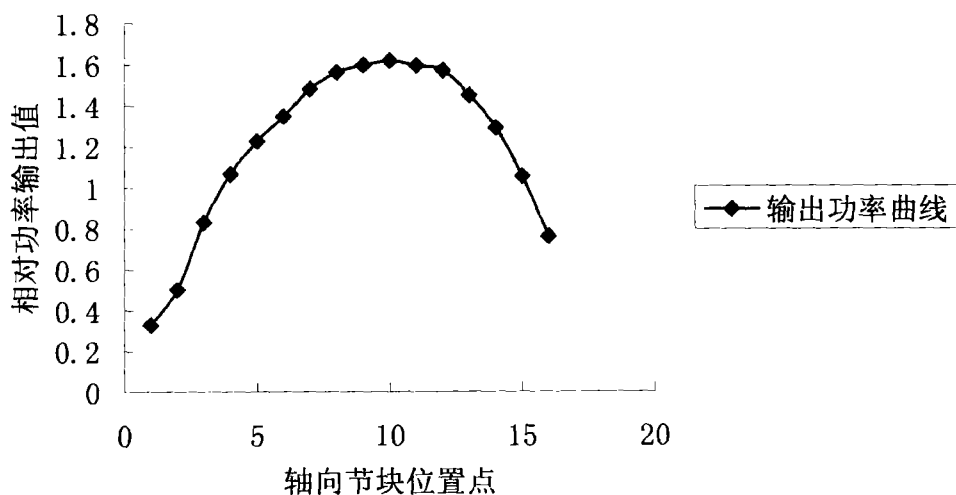


图 4.10 G 7 管的输出功率数据

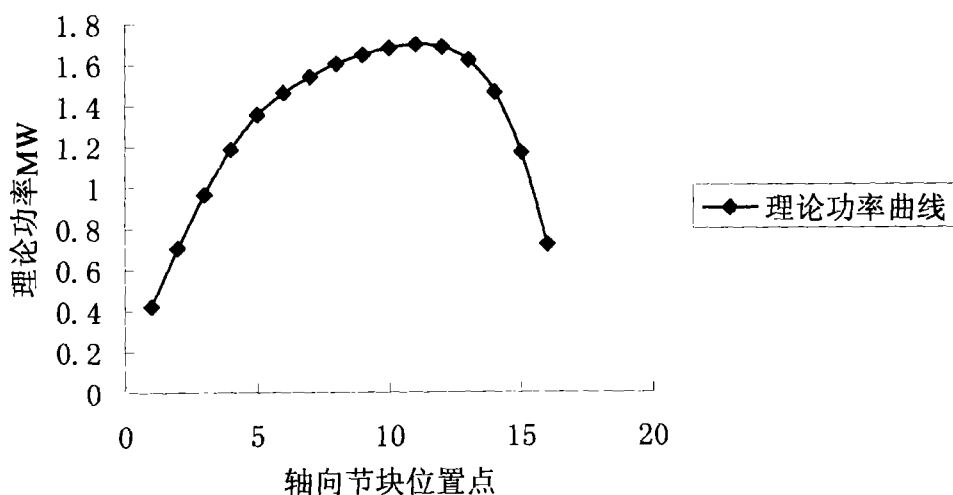


图 4.11 G 7 管的理论功率数据

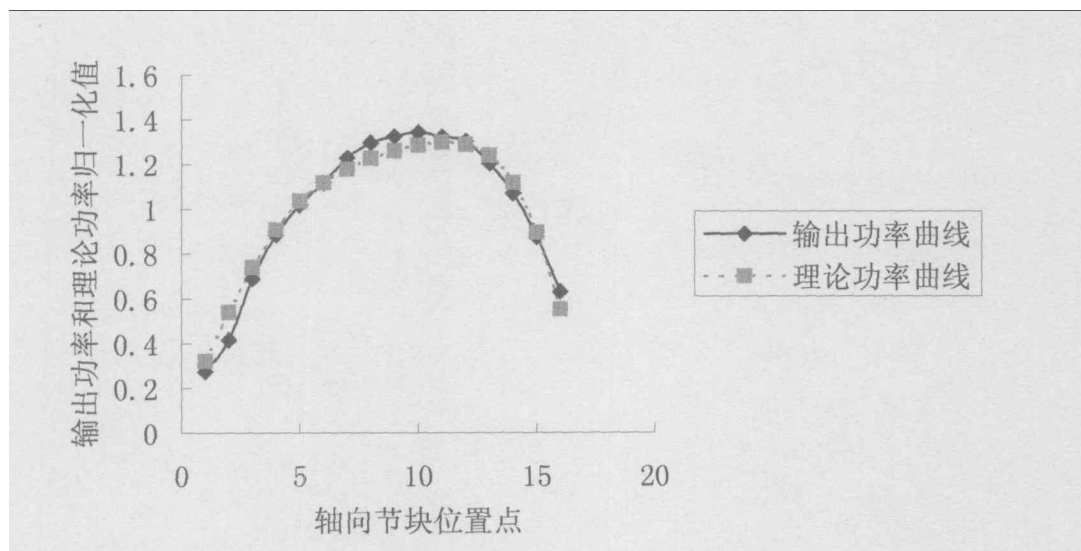


图 4.12 G 7 管的归一化比较

从这几幅图上可以总结出上前面几幅图同样的结论。同样也可以判断出我们是用这个程序的正确性和可信性。这样的程序是可以满足本文的要求的。

这样,就可以输出数据传递给理论计算系统中,对那里计算的数据进行校核,最后达到对反应堆进行实时监测的作用。

4.7 本章小结

本程序是一个在线的数据处理的计算程序,是用 V-FORTRAN 语言进行编写的。

在程序编写的这一小节中,先要知道,在这个在线数据处理的计算程序中,是有一个大的主要程序和很多子程序一起合成的,主程序只有调用和驱动各个子程序的作用。而各个子程序的功能的实现才是本程序最后得以实现的关键。本章也简单的介绍了几个子程序的编写,其中有零点的处理方法等等,其他的子程序有本底活性的消除、探测器的探测数据向反应率数据的转化、数据的校正和校核以及最后数据计算的进行规定格式的输入等等的子程序,最后,本文将数据的输出结果进行了数据分析。

本章对数据结果经过分析可知,最后的结论是可信的,说明程序

的编写和模型的选用是合理的。权重函数的计算也是正确的。

结 论

本文在了解秦山二期反应堆的堆芯的一些物理参数、学习核测量的原理、研究在线数据处理的方法之后，建立了在线的反应堆堆芯功率分布监测数据的处理模型，并且编写了在线的数据处理的程序。

在在线数据初步处理和数据转化阶段，在线数据处理程序进行了补零，去本底，校核，删除和数据转化的数据处理，结果由 42 组扫描数据输入输出了 38 组数据（进行了校核数据和删除数据）通过输出数据与探测数据的归一化对比，可知道转化后的数据与原来探测数据偏差很小，结果可信。

在进行数据的计算处理后，得到的数据与输入的理论数据和探测数据进行了归一化对比，结果也是满意的。

以上结果表明，本文的在线数据处理的模型的建立是合理的，程序的编写也是正确的。综上所述，本文所使用的探测原理和在线处理数据的方法是正确的。

参考文献

- [1] 朱继洲等编.核反应堆安全分析,西安交通大学出版社,2000.
- [2] 濮继龙.压水堆核电厂安全与事故对策,原子能出版社,1995.
- [3] 栾锋.反应堆放射性气体迁移仿真研究.(硕士论文)哈尔滨:哈尔滨工程大学动力与核能科学工程学院,2004.
- [4] 朱继洲主编.压水堆核电厂的运行,原子能出版社,2000.
- [5] 钱承耀主编.核反应堆仪表,西安交通大学出版社,1999.
- [6] 凌球 郭兰英等编.核电站辐射测量技术,原子能出版社,2001.
- [7] 夏虹 曹欣荣 董惠.和工程监测仪表,哈尔滨工程大学出版社,2002.
- [8] 曹欣荣 赵强 张志俭.堆芯物理在线仿真与核测量系统接口数据研究,第九届反应堆数值计算和粒子输运学术会议暨反应堆物理会议,2002.
- [9] 谢仲生 张少泓.核反应堆物理理论与计算方法.西安交通大学出版社.2000.
- [10] J. R. 拉马什著.洪流译.核反应堆物理导论.北京:原子能出版社,1977.
- [11] knoll G F. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & SONS Inc..New York, 1979.
- [12] 钱承耀.压水堆核电站仪表.深圳:广东大亚湾核电培训中心,1996.
- [13] 朱继洲.核反应堆运行.北京:原子能出版社,1992.
- [14] 钱承耀.核电站仪表.西安:西安交通大学教材,1995.
- [15] J. F 勃兰德.核反应堆的堆芯仪表.北京:原子能出版社,1993.
- [16] 周培森.自动监测与仪表.北京:清华大学出版社,1998.
- [17] 陈济东.大亚湾核电站系统及运行.北京:原子能出版社,1994.
- [18] 毛正宥 蒋树庆.堆芯测量数据处理程序 用户手册 核工业核电软件中心.

- [19] 复旦大学、清华大学、北京大学合编. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [20] 常健生. 监测与转换技术. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [21] 亚洲仿真控制系统工程(珠海)有限公司. 高级仿真支撑软件(ASCA)
- [22] 毛正宥 堆芯测量数据处理程序 程序员手册 核工业核电软件中心.

攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

1. 范岩成, 曹欣荣, 赵强. 反应堆堆芯测量数据在线处理. 中国核学会计算物理学会第十届 反应堆数值计算和粒子输运学术会议暨 2004 年反应堆物理会议

致 谢

本论文的是在导师曹欣荣教授的指导下完成的。曹老师在工作中给予了我详尽指导与全力支持，在本文的撰写过程中，提出了许多宝贵意见，并且在生活上给予了我很多关心和帮助。在此表示衷心的感谢，并表达我最诚挚的敬意。

同时感谢哈尔滨工程大学核动力仿真研究中心的老师 and 同学们，为我的工作提供了良好的条件和多方支持。

最后，要感谢始终支持我的家人，是他们给予了我珍贵的亲情、学习动力和克服困难的勇气，让我顺利完成学业。