

复合材料离心机转子的分析与设计

同位素分离专业研究生 武兰河 指导教师 赵鸿宾

众所周知,离心机的单机分离功与转子旋转的线速度的四次方成正比,因此,提高转子的线速度是提高离心机分离能力最为有效的途径,然而转子旋转的线速度受到材料比强度的限制,金属离心机转子已经没多大的发展潜力,要大幅度提高转子的线速度,只能开发新型材料,复合材料具有很高的比模量和比强度,而且具有良好的抗疲劳性能和良好的加工性能并具有重量轻的特点,这些特性对提高离心机的转速,提高离心机转子的寿命,降低离心机的功耗,都是非常有利的,可以说,要提高离心机转子的线速度,复合材料是目前唯一可供选择的材料。世界上主要的轴生产国除法国以外,几乎都研制了复合材料离心机,并论证了复合材料离心机的经济性,指出,至少在本世纪末,离心法的经济性不会逊于激光法,种种情况表明,复合材料离心机具有广阔的发展前景和技术潜力,研究复合材料离心机具有重要的意义。

本文用有限元的方法对复合材料转子结构进行了大量的计算和分析,所选择的单元是修正的二维曲厚壳元,它考虑了横向剪切变形的影响,能计算壳体厚度方向的应力,并可以计算组成复合材料转筒的每一单层的应力。文中推导出了单元刚度矩阵以及应变、应力、位移等矩阵表达式。目前,研究层迭复合材料转筒受“风型”载荷的文献很少,本文特别着重给出了旋转壳体受非对称载荷下的表达式,并以金属离心机转筒为例进行计算,其结果同已有的一维曲壳元的计算结果相比,具有较好的精度。

本文主要从强度分析入手,并考虑离心机转子旋转刚度的要求,研究复合材料转子的设计规律。文中利用上面提到的有限元程序对由层迭正交异性复合材料组成的轴对称壳体在各种载荷下的位移、应力等做了大量的计算,并考虑铺层的厚度比,铺层的角度等各种因素对转筒和波纹管的强度和刚度的影响,得出了一些设计规律,根据这些设计规律,提出了改善复合材料转子性能的几种方法。文中指出,转子的铺层方案为周向层加角铺层的方式,其中角铺层的角度 α 在与轴向成 25° 时转筒的强度和刚度分配最佳,而周向层与角铺层的厚度之比为 3 或 4 时为宜,对性能较好的材料其极限转速可以达到 700 米/秒。文中还指出了复合材料的一些特殊性,特别是复合材料波纹管与金属波纹管相比有其独特的性质,文中最后给出了两种转子结构方案,一种是利用金属波纹管的复合材料转子结构,一种是完全复合材料缠绕的转子结构,它们都可以在 600 米/秒 550 米/秒的转速下运行,并可以保证,在满足离心机转子动力学要求的情况下稳定地运转。

答辩日期:1989 年 6 月 6 日

聚变-裂变混合堆包层中的分别优化和 就地发热可行性探讨

同位素分离专业研究生 谢剑平 指导教师 应纯同 李兴中

本文从经济建设发展的战略眼光出发,分析了我国和全世界对能源的需求情况,指出了开发新的能源技术——聚变技术的必要性。鉴于聚变研究的实际状况,我国学者先后提出了一些聚变-裂变混合堆的设计思想,^{[1][2]}目的是使聚变技术早日造福人类。根据将氘增殖比 T 和能量倍增比 M 在不同包层分别优化的设想和把包层中增殖的核燃料就地燃烧以增加包层能量倍增的方案,^[3]我们从中子学角度,初步探讨了它们的实际可行性。

本文使用的计算工具是 ANISN 程序和 UW 截面库。为了评价 UW 库计算的可靠性,本文将从此得到的结果与国内外同行得到的相应理论和实验结果作了大量比较,^[4]发现两者相差均在 10% 以内。这说明本文使用的计算工具是可靠的,得到的结果是可以信赖的。

本文对氘增殖包层的最大氘增殖比作了一些探讨。在不考虑引入裂变材料的前提下,就 Be、pb 的中子倍增性能比较、包层结构以及包层中各物质含量作了许多分析计算,确认了 Be、Li 均匀混合包层和 Be、Li 依次间隔排列的多层包层对于提高氘增殖比的重要性,通过对 Be、Li 含量的优化计算,我们得到了不考虑结构材料下的最大氘增殖比为 2.94;在对包层作一定工程考虑后,这一数值降为 2.48。

在有关包层能量倍增的计算中,本文详细研究了包层中裂变物质的核子数密度的变化对能量倍增比 M 的影响,发现如果让包层中增殖的核燃料就地燃烧,确可以大大提高 M 的值。在对我们研究的发热包层作均匀简化假设后,求得它在 $21 \text{ MW}\cdot\text{r}/\text{m}^2$ 的辐照深度内的平均能量倍增比为 38.1;而且这样一个较大的 M 在考虑到聚变堆芯的一些实际参量后仍可以满足热工冷却等方面的要求。同时由于包层中没有氘的增殖,它所需的氘由专门产氘的包层提供,因此没有氘的渗漏问题,减轻了混合堆设计和建造的工程困难。

根据以上结果,在保证系统氘自给前提下,本文求得氘增殖包层和发热包层组成的共生系统在就地发热过程中 ($21 \text{ MW}\cdot\text{r}/\text{m}^2$) 的总平均能量倍增比为 22.7。因此,利用分别优化和就地发热的设想,将氘渗漏问题和裂变碎片带来的困难分开考虑是可行的;而且这种共生系统不进行包层增殖的燃料的回收处理及其较大的总平均能量倍增,这使得它在工程和经济等方面具有较强的竞争能力。我们通过计算还发现,在发热包层中,燃料的积累一直在增加,使得包层愈来愈趋于临界,所以必须对混合堆的运行上限加以控制,以满足热工和安全的要求。

此外,这种分别优化的思想还可以推广到其他类型的包层设计中。例如我们可以设

计将燃料增殖包层和氚增殖包层共生的混合堆系统, 预期它也可能具备工程技术方面的许多优点和较好的经济效益。

答辩日期: 1988 年 12 月 6 日

高速气体离心机中稀薄气体效应的影响

同位素分离专业研究生 贾换锁 指导教师 应纯同

当用于六氟化铀同位素分离的气体离心机转速很高时, 离心机中气体处于稀薄气体状态(存在粘性流, 过渡流和分子流)。以往的离心机流动特性和分离特性的分析大都基于连续流体动力学, 在稀薄气体情况下连续流体动力学不再适用, 离心机中稀薄气体效应对离心机流动特性和分离特性的影响是需要解决的问题。调研到的与离心机中稀薄气体效应有关的文献都只讨论了流场和扩散(分离)的一个方面, 且对流场的讨论很不成熟, 更没有讨论高速离心机(存在分子流)中轴向剪切流的文献。

本文运用“粘性流+分子流”的简化模型, 同时考虑了高速离心机中稀薄气体效应的流场和扩散两个方面, 重点讨论了流场问题。将 Pomraning 的平面模拟模型中运用的强外力情况下的匹配方法引入了高速离心机流场的求解过程, 求得了离心机中轴向弱剪切流的近似表达式。在求解时假定粘性流区为单纯轴向流型, 且应用了薄层近似假设, 此外只考虑了粘性流区的轴向速度扰动对分子流区的影响。应用此流场结果及已有的粘性流区和分子流区的扩散系数表达式讨论了稀薄气体效应对离心机分离功率的影响, 在讨论时采用了径向平均方法, 并忽略了轴向反扩散对径向丰度分布的影响。为了对比, 本文还讨论了忽略分子流区气体影响时的情况, 求得了流场分布及分离功率。本文所得主要结论如下: (1) 流场, 在无轴向环流时, 在“粘性流+分子流”分区模型下离心机内流场处于等温刚体旋转状态。给出了一种求解离心机中轴向流分布的近似方法, 并由此讨论了离心机转速为 600m/s 和 800m/s 时的轴向流, 可看出稀薄气体效应造成的流场变化很小(相对于全粘性流假设下结果而言), 由此流场变化造成的离心机分离功率的变化也很小。在近似计算中, 可以不考虑稀薄气体效应对流场的影响。

(2) 分离功率。考虑稀薄气体效应后计算出的离心机的分离功率变大, 流场变化引起的离心机的分离功率很小, 考虑稀薄气体效应对离心机分离功率变大, 流场变化引起的离心机的分离功率的变化很小, 考虑稀薄气体效应对离心机分离功率的影响主要应考虑轴向反扩散变化的影响。在稀薄气体情况下离心机中轻组分的轴向反扩散输运量减小, 对分离有利, 故导致计算出的分离功率较全粘性流假设下结果为大。(3) 在近似计算中可采用“粘性流+真空”的分区模型, 此时的关键是确定两区的分区点, 分区的主要依据是轻组分的轴向反扩散质量输运量, 这是由于稀薄气体效应的影响主要是对轻组分的轴向反扩散质量输运量的影响, 本文讨论了三种分区点的确定方法。

本文通过简化模型研究了离心机中稀薄气体效应的影响, 给出了这一问题的一种解

决方法。

答辩日期: 1988 年 12 月 6 日

C4-2离心机转子结构可靠性分析方法

同位素分离专业研究生 宁 江 指导教师 沈祖培

本篇论文的研究对象是机械部件和由部件或失效模式组成的机械串联系统; 研究内容是机械可靠性的分析方法, 并利用研究的结果分析了 C4-2 离心机转子结构的可靠性及寿命, 得到的结果对转子今后的设计和改进有一定参考价值。

对于单个部件, 可靠性分析的理论基础是应力-强度干涉模型, 根据这种模型可以推导出可靠度的理论积分公式。在得到应力和强度的统计分布类型及分布参数后, 可利用数值积分公式和程序计算部件的可靠度。当没有足够的数据或经验推断应力和强度的分布类型, 可以运用设计验算点法, 借助计算机程序来计算部件可靠度。

对于由部件或失效模式组成的机械串联系统, 考虑了普遍存在的应力相关性和强度相关性。在假设应力和强度均为二维正态分布随机变量条件下, 证明了强度裕量也是 n 维正态分布随机变量, 并且分布参数由应力和强度的分布参数决定。此时, 系统的可靠度由一个 n 维积分得到。

英国人 Stuart 提出了一种计算串联系统可靠度的积分公式, 假设条件是①应力为常数②强度正态分布且等相关③可靠性指标均相等。本文将这三个假设进行了改进, 扩大了适用范围得了改进后的 Stuart 公式, 该公式可以较简单地数值计算串联系统可靠度。

根据推导的各种可靠度计算公式, 用 FORTRAN 语言编制了数值计算程序—M-SSQ 程序, 该程序的主要功能有:

1. 用应力强度干涉模型方法计算单个部件的失效概率。
2. 用设计验算点法计算部件的失效概率。
3. 计算不相关串联系统可靠度。
4. 计算由相关部件或失效模式组成的串联系统的可靠度。

运用 MSSR 程序计算了 C4-2 离心机转子的静态可靠度, 并对影响可靠度的因素进行了分析。考虑到转子工作介质为 UF₆, 对转子有腐蚀作用, 转子材料强度将随时间增加而下降, 文中计算了转子的动态可靠度, 得到转子可靠度随时间的下降曲线。另外还计算了转子的平均故障率, 转子部件的平均寿命和可靠寿命等主要可靠性指标。

答辩日期: 1988 年 12 月 6 日

激光诱导荧光法测量钆(Gd)原子束速度及速度分布

同位素分离专业研究生 王永刚 指导教师 王德武

本论文的工作是根据国家“七五”计划下达的任务进行的。

传统的测量原子速度的方法是“飞行时间法”。这种依靠机械装置的方法误差较大，西德的 W·Berres 等人利用激光诱导荧光法(LIF 法 Laser Induced Fluorescence)测量了用欧姆法加热蒸发铪(Zr)原子的速度分布。在实验中，利用了所谓镜面效应来确定零点。但工程上很难产生镜面效应，因此，本课题从工程实际应用出发来解决测速问题。

本文利用 LIF 法测量了稀土元素钆(Gd)的速度及速度分布。用电子枪加热金属产生原子束。利用无多普勒光谱确定零点(速度为零的点)。利用连续波染料激光测量了两条波长即：(5792.9Å 及 5804.5Å)下的速度及速度分布。发现了原子束的平均速度随加热功率的变化规律。提出了速度分布曲线不同于荧光强度曲线的概念。推导出了从荧光强度曲线上求平均速度的方法。

根据多普勒效应：

$$\gamma_L = \gamma_0(1 - v_z/C)$$

γ_L 为激光频率， v_z 为原子束与激光平行方向的速度，不同速度的原子具有不同的共振跃迁频率。随着激光频率的扫描，不同速度的原子被激发，在退激过程中发出荧光，用光电倍增管将荧光信号转变成电信号记录下来，得到荧光强度随激光频率的变化曲线。经过处理即可得到速度分布曲线。

理论上，将 Maxwell 速度分布函数对垂直于激光束方向的速度积分得到：

$$dn/dv_z = n \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT_u} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{m}{2kT_{11}}(v_z - u)^2 \right]$$

这就是原子束的速度分布函数。从三能级系统的速率方程出发，得到一个原子处于激发态的几率。并由此推导出荧光强度曲线和速度分布函数的关系：

$$I = D \cdot v_z \cdot \frac{dn}{dv_z}$$

其中 D 为与激光强度、跃迁几率、检测效率、波长、几何条件等有关的常数，并由此推出从荧光曲线上求平均速度的公式：

$$dI/dv_z = I/v_z$$

在实验技术上，改进了波长计，解决了找波长难的问题。设计了合理的接收系统。

在两条波长下，测量了不同加热功率时的平均速度。对实验结果进行分析可以得出以下几个结论：

1. 当电子枪加热功率较小时，原子束的平均速度增加较快，当加热功率增加到一定

数值时, 出现饱和趋势。

2. 速度的测量结果与波长的选择无关。

3. 原子经过有冷却套的 100mm 距离飞行后在亚稳态上仍有很强的热布居, 并非都回到了基态。

4. 理论曲线和实验曲线符合得相当好。

答辩日期: 1988 年 12 月 6 日

同位素分离过程的热力学分析

同位素分离专业研究生 魏锦华 指导教师 应纯同

这篇论文从热力学角度系统地讨论了铀同位素分离过程。在分离理论方面, 在普遍情况下推导出价值函数。研究了价值函数、分离功的热力学含义。得出了价值函数是混合物各种组份化学势差的和以及分离功 ΔU 与理想气体混合熵 ΔS_m 的关系。分离功 ΔU 与混合熵的变化总是符号相反, 对于一个分离过程 ΔU 总是大于零。并且把理想气体混合熵进行了比较。

论文定义了可逆过程, 不可逆过程和不可逆过程的热力学效率。热力学效率是衡量一个分离过程的不可逆程度和比能量的。气体扩散和热扩散分离铀同位素的热力学效率很低。分别为 10^{-3} 和 10^{-7} 量级。论文以热力学效率为依据。在理论上推导出了气体扩散的最佳工作条件是膜前后的压力比为 4:1 和热扩散热力学效率最大。

在能量消耗方面, 热力学上完全可逆的分离过程的能量消耗较大。论文运用非平衡态热力学理论分析了不可逆过程能量消耗大的原因, 并且推导出在弱分离情况下, 不可逆分离过程能量消耗的低限为 $4RT/e_0^2$ 。并且得到了气体扩散方法分离铀同位素在最佳条件下的比能量消耗值是 578 千瓦小时每千克分离功。

论文在最后一部分对气体离心法和原子蒸汽激光同位素分离的能量消耗进行了估计。气体离心过程是可逆过程, 但它的能量消耗比热力学上完全可逆过程在理论上得到的值大得多。论文分析了能量消耗大的原因: 这是由于为了创造可逆过程的分离条件需要消耗很大的能量。激光分离同位素的比能量消耗能同气体离心法相比, 但它是因为激光电离的选择性, 而不是过程的可逆性。最后, 论文就气体扩散法, 气体离心法和激光分离同位素的能量消耗、热力学效率进行了比较。

答辩日期: 1989 年 6 月 6 日

多组分离心级联的分析研究

同位素分离专业研究生 孙世平 指导教师 蒋同远

浓缩铀工厂实际供料必然有杂质,有时供料是堆后料,其中含有多重铀同位素。本文主要对多组分离心级联进行分析研究,并在依据各种不同流体或分离条件建立模拟性的数学模型并计算的基础上,得到一些重要结论。

首先,对双组分离心分离问题有所总结。以双组分离理论为基础、推导出了多组分离问题中价值函数、分离功等基本概念的定义和计算关系式。在采用堆后料供料,供料各组分丰度已知情况下,对多组分离问题在理论上进行了分析,得到与双组分相同的分离功计算式,后面利用所得的数学关系式、对分离系数为常数已知, U^{235} 丰度匹配的级联进行了计算得到了级联的总流量和精取料中各参量值。

第二章内容是:在严格的数学推导之下,得出铀 235 丰度匹配的级联各参量计算式并对简单数学式计算结果验算,证实了分离功近似计算公式是确定的,可信的。从而说明了多组分离中,低丰度的各杂质组分对铀 235 和铀 238 组分的分离影响很小,完全可按双组分计算分离问题。

为了正确地得出级联各组分的丰度分布,我们建立了多种条件下求解丰度分布的数学模型,对计算结果还进行了验算。

第三章中,在离心级联各级流量值和分离系数作为已知参量时,建立了牛顿迭代法求解多组分丰度分布的数学模型,并以已知的丰度比匹配级联求结果输入求解,对丰度分布比较结果,确认了此模型的合理性。

对于实际离心级联的多组分分离问题,我把双组分实际离心级联的数学模型推广到多组分分离情况。对多组分离心分离级联进行了充分的数学描述,并完全求解出了铀多种同位素离心级联的分离问题。

在第六章中,由离心级联实际分离状态的求算结果反算实际多组分离心级联的流体状态各参量值,与实际离心级联的流体状态各参量值比较、另外以第三章建立的数学模型对实际离心级联的各组分丰度分布验算、都同样条到确定的结论:实际多组分离心的分离级联数学模型正确模拟了铀浓缩问题。可以用于实际计算。

最后我们可以认为铀同位素分离的产品受杂质影响很小,对各组丰度要求经计算也可达到。

答辩日期: 1989 年 6 月 19 日

蒸发冷凝过程的实验研究

同位素分离专业研究生 熊一然 指导教师 钱绍圣

本文报告了 275 号扩散泵油在蒸发冷凝过程中, 蒸气与液体界面附近温度跳跃和蒸气温度分布的实验结果。实验时, 从油面(蒸发面)蒸发的蒸气在与油面相距 636 毫米的球形冷凝面上冷凝。在两面之间设置一些热电偶来测量温度。其中四个套管热电偶用来测量蒸气温度, 一个表示热电偶测量冷凝面温度, 对于蒸发面附近(包括蒸发面)温度分布则采用一个可移动的三点式热电偶来测量。测量点的坐标(以蒸发面为参考点)分别为 0、75、375、525、635、和 636 毫米(此点为冷凝面位置)。蒸发面温度控制在 372—464K 范围内。

实验表明: (1) 温度跳跃不仅存在于冷凝面附近, 而且我们还首次发现在蒸发面附近也存在。在实验温度范围内, 蒸发面温度跳跃为: $\Delta T_e = 7 \pm 1.5^\circ\text{C}$, 而且当蒸发面温度较大时, ΔT_e 则较小。这是因为在蒸发过程中, 液体分子要吸收一部分能量(大小等于物质的蒸发潜热)来克服液面对它的束缚力, 当蒸发的液体失去这部分能量变成气体, 其内能减小, 这必定表现为温度下降。当液面温度 T_e 较低时, 蒸发所需要的能量增加, 因而由此所引起的温度跳跃也相应变大; (2) 在弱蒸发冷凝实验中, 蒸发面和冷凝面的温度跳跃分别为 $\Delta T_e = 3^\circ\text{C}$, $\Delta T_c = 24.4^\circ\text{C}$ 这一结论定性与理论相一致, 这一点与文献[19]中水银冷凝实验中首次得到的冷凝面温度跳跃结果类似。同时, 以我们得到的蒸气温度分布曲线可以看到, 在部分区域出现了负温度梯度, 但是不同于理论上的逆温度分布曲线。因此, 从实验上验证逆温度现象的存在与否还需要进一步的努力。(3) 在冷凝器中通冷却水有助于加速蒸气的冷凝。我们发现, 冷却水流量的变化对蒸气冷凝影响不大, 但冷却水的温度变化对其影响则较大。(4) 在冷凝器的设计过程中, 我们采用了球形冷凝面。其目的在于使得冷凝下的液体能沿冷凝面流下并收集起来, 这样也可以避免液体垂直落下而干扰蒸气流场。在选择冷凝面的参数时, 主要是通过水和机械泵油的实验来确定。在 275 号扩散泵油的正式实验中, 通过观察发现, 没有液滴垂直落下, 这说明采用球形冷凝面收集液体是有效的。

最后, 文章给出了热电偶测量温度的误差估计。

答辩日期: 1989 年 7 月 1 日

大型PWR核电站堆芯物理设计的校核计算

反应堆物理专业研究生 苏炳静 指导教师 张育曼

随着我国秦山、广东两核电站的兴建，核电站的设计审批工作已成为十分迫切的问题。但是，目前国内还没有形成一套我们自己的经过验证的用于堆芯设计或设计审评的计算程序，即使引进开发的国外先进程序也大多没有取得实际工程应用的经验。

为了为广东核电站的堆芯物理设计审评积累经验，本文应用以核工业总公司一院开发的 CARMP 程序包为主的一套程序，对美国 Ziou-2 核电站的 PWR 堆芯的物理启动参数和运行参数进行了校核计算，并与实验测量值作对比分析。

在计算堆芯启动参数时，本文首先使用 CPM 程序计算了堆芯内各种燃料组件的少群常数；然后根据计算的少群常数，应用 NGFM 程序进行堆芯稳态物理计算，进而得到我们所关心的各种启动参数。计算结果表明：临界硼浓度、控制棒当量和温度系数的计算值与测量值之间的误差分别为 1%、3% 和 3%，计算精度达到了国际水平。

在计算运行参数时，本文使用了 CARMP 程序包的主流程，对各种燃耗状态下的堆芯三维功率分布进行了计算，计算结果与测量结果之间的误差在 10% 以内。但是在应用此流程计算 Xe 振荡中的轴向功率倾斜时，结果不理想，只能反映大概的趋势。

答辩日期：1988 年 11 月 11 日

我国 2×60 万千瓦压水堆核电站投资 研究和电力成本分析

反应堆工程和反应堆安全专业研究生 郝磊明 指导教师 李桂华

随着我国核电事业的起步，核电站的经济分析已经变成一个具有实际意义的重要课题。本文研究了 2×60 万千瓦压水堆电站的比投资和电力成本，并且作了敏感性分析。同时，本文总结出一种对核电建设项目作财务分析的方法。

论文工作主要分三个部分：

一、构造核电站的投资模型。本文所要研究的电站 1990 年初开建，1998 年初建成并投入运行，建造期 8 年，运行期 30 年，电站功率 2×63.3 万千瓦，建造地点浙江省。为求该电站的建造投资和电力成本，本文构造了参考电站模型。参考电站模型由人民币 (RMB) 和西德马克 (MK) 两个模型构成，分别给出人民币投资和西德马克投

资的基准值,参考模型中的投资均以1986年的现值为基准。参考模型的主要内容包
括:参考电站的投资费用项、各个费用项中设备、材料和劳务分项的投资、归一化的累积
投资时间分布、各种价格指数的历史数据,各费用分项对这些价格指数的权重因子和参
考电站在参考年(1986)的费用指数。

二、利用 CONCEPT-5 程序包计算所研究电站的基础投资和建成投资。其主要
原理是:首先考虑物价的浮动,将参考电站的各项投资费用利用费用指数的办法转换成
所要研究电站开始建设年的相应费用,然后相加便得到所研究电站的基础投资;其次考
虑建造期内的费用增长(由价格浮动引起)和利息,计算出建造完工时帐面总投资,即
建成投资。投资除以净电功率便得到相应的比较投资。

三、用 NECY 程序计算所研究电站的电力成本和经济指标。计算采用动态方法,
主要参数为基础比投资。电力成本包括发电成本和售电成本,分别对还款期(15年)、
盈利期(15年)和运行期(30年)求出平均电力成本。然后确定售电价格,使电站在还
款期内能够还本付息。售电价格确定后,计算内部收益率和动态投资回收期等经济指
标,并对电站税后利和国家收益进行计算分析。本文对各种经济技术参数变动所引起的
投资和成本的变化作了敏感性分析,并且指出了减少投资和降低成本的有效途径。

通过论文工作,精确计算了我国 2×60 万千瓦电站的投资和电力成本,并作了敏感
性分析。同时,本文中所使用的研究方法可以应用到各种核电站的经济分析中,也可以
应用到高技术项目的评价比较中。

答辩日期: 1988 年 12 月 7 日

氢计钠回路的冷阱设计及数值模拟分析

反应堆工程和反应堆安全专业研究生 王徽成 指导教师 赵兆颐

本文所论述的是八六三高技术项目中氢计钠回路的重要净化设备——冷阱的设计研
究工作。文中综合分析了国内外实验冷阱及快堆冷阱的运行经验和发展状况,参考了国
际最新成果——法国超凤凰堆的冷阱结构形成,根据氢计钠回路的具体情况,以系统简
单,安全、效率高、操作方便为原则,对本回路的冷阱进行了全面、系统的设计和研
究。

文中通过对冷阱及其回热器的详细设计计算,包括热工水力计算和结构强度计算
等,绘出了全套图纸。

文中通过对冷阱内部传热、传质机理的深入研究,经过合理的假设和严密的理论推
导,编制了冷阱的热工设计程序和数值模拟分析程序。通过程序计算进行方案比较,最
后选定冷阱结构型式为径向分流式,并采用回热器外置式法兰结构,使得结构简单、装
拆方便、捕集容量大、效率高等。冷阱的数值模拟分析槽型基于以下三点假设:①在同
一水平截面,同一区内(如:空气区 A,脏钠区 B,净钠区 C),认为温度均匀,且

轴向导热忽略不计。②在同一微元段内，速度分布均匀。③忽略保温层散热损失。

基本方程包括：

热平衡方程：

$$\begin{cases} \frac{dt_A}{dx} = \frac{(k_h \cdot l_h)_{AB}}{(w \cdot c_p)_A} \cdot (t_B - t_A) \\ \frac{dt_B}{dx} = -\frac{(k_h \cdot l_h)_{AB}}{(w \cdot c_p)_B} \cdot (t_A - t_B) + \frac{(k_h \cdot l_h)_{BC}}{(v \cdot c_p)_C} \cdot (t_C - t_B) \\ \frac{dt_C}{dx} = -\frac{(k_h \cdot l_h)_{BC}}{(w \cdot c_p)_C} \cdot t_B - t_C \end{cases}$$

k_h ——两相之间的传热系数 $W/(m^2 \cdot C)$ ；

l_h ——润湿周边，m；

t_A, t_B, t_C ——各区对应节点温度， $^{\circ}C$ ；

质平衡方程 $\frac{dm}{d\tau} = H_m A_m (c - c_x)$

其中： H_m ——传质系数，m/s； A_m ——杂质沉积表面积 m^2 ；

c ——液钠杂质浓度，ppm； c_x ——壁面杂质浓度，ppm。

采用差分方法解方程组，然后编制计算分析程序。该程序可以模拟杂质沉淀和杂质浓度变化过程。通过改变系统的浓度变化值，并输入计算机中，就可以模拟杂质泄漏进入系统时，冷阱捕集杂质的过程。该程序还可以用来设计试验方案，预测冷阱参数，进行计算辅助设计等。

本文在国内首次采用计算机数值模拟分析方法，在实验条件还不完备的情况下，进行了冷阱的专题研究，计算得出了冷阱内部的温度场、浓度场、杂质沉淀分布等。它拓宽了冷阱的研究手段，避免了实验工作的测量困难，为将来优化设计快堆实用冷阱打下了基础。

答辩日期：1989年6月10日

水泥生料配比自控系统可靠性分析

反应堆工程和反应堆安全专业研究生 陈 鹏 指导教师 冯志潜

为了满足用户对水泥生料配比自控系统的可靠性要求，为了提高华海公司该产品的竞争力，开展了水泥生料配比自控系统的可靠性研究。论文分别从可靠性统计和可靠性预计的角度对系统的失效率、首次故障平均时间和可靠度等指标进行了计算，另外，在可靠性预计的基础上找出了系统的薄弱环节并提出了具体的改进意见。

传统的失效数据统计处理方法是先验地假设数据服从某个分布，然后用概率纸作图

法或假设检验法判断“假设”是否可以被接受。本文采用“最佳逼近”和“假设检验”相结合的方法来确定失效数据的分布。具体过程分为两个步骤。

(1) 最佳逼近

记 $\bar{P}(t_i)$ 为 t_i 时刻的不可靠度观察值; $F_j(t_i)$ 为按分布 j 计算的 t_i 时刻的不可靠度“预测值”, 分布的参数根据样本值计算; k 为失效数据总数。 $j=1, 2, 3, 4$ 时, $F_j(t)$ 分别为指数分布, Weibull 分布, 正态分布及对数正态分布的 C, P, D, F 。最佳分布的 $C, P, D, F F_j(t)$ 满足: $\sum_{i=1}^K [F_j(t_i) - \bar{P}(t_i)]^2 = \min$ 。本文对 $\bar{P}(t_i)$ 的计算方法进行了细致的讨论。

(2) 假设检验

检验失效数据满足上一步骤所选分布的假设能否被接受。文中“最佳逼近”的结果为指数分布, Andson-Darling 检验判定指数分布这一假设可被接受。

为了进行可靠性预计, 本文将整个系统分为六个彼此独立的单元, 它们是: 电源, 执行机构驱动用电控制机构, 质量传感器, 微机, 微机外设和各单元间的连接件。预计方法采用可靠性框图分析法。大部分元器件的失效率是采用“应力分析法”计算而得的, 还有一些元器件采用通用失效值。另外, 有一部分器件失效率值是用 Bayes 估计法得到的。

论文第二章详细地讨论了针对电子产品可靠性研究的 Bayes 方法。验前分布 $h(\lambda)$ 选为 Γ 分布。 $h(\lambda)$ 的参数由下式确定:

$$\int_{\bar{\lambda}_1/K_1}^{K_2/\bar{\lambda}} h(\lambda) d\lambda = 0.99$$

式中 $K_1, K_2, \bar{\lambda}$ 由 Bayes 方法的使用者提供。取验后分布 $k(\lambda/r)$ 的均值 $E(\lambda_b) = \int_0^{+\infty} \lambda k(\lambda/r) d\lambda$ 为元器件失效率值。

可靠性统计结果 MTTF=3900 小时。

可靠性预计结果 MTTF=3984 小时。

论文提出了降低“故障危害度”最大的 13 个元器件的失效率的具体措施。

附录中列出的程序是文中各种运算所需的, 也是有推广价值的可用于电子产品可靠性研究的程序。这些程序包括:

一、Bayes 估计程序。

二、集成电路失效率计算程序。

三、国产分立电子元器件失效率计算程序。

四、进口(美、日)分立电子元器件失效率计算程序。

五、多功能可靠性统计程序。

[注] C, P, D, F 为累积概率分布函数。

答辩日期: 1989年6月10日

自然循环蒸汽发生器稳态数值分析和 TRAC-PFI 程序绘图功能的开发

反应堆工程和反应堆安全专业研究生 柳耀权 指导教师 赵兆颐

随着我国核能事业的发展,核电站的安全可靠性研究已成为一项十分迫切的问题。反应堆瞬态分析程序 TRAC 是美国 Los Alamos 国家实验室研制的大型反应堆安全分析程序。本文的工作就是在前人工作的基础上,用 TRAC-PFI 程序对自然循环蒸汽发生器进行稳态数值分析,总结出自然循环蒸汽发生器稳态调试的方法。另外,作者还对 TRAC-PFI 程序的绘图功能进行开发研究。

首先,作者以秦山核电站蒸汽发生器为例对自然循环蒸汽发生器进行稳态调试。结果表明,阀门部件的流动面积和模拟汽水分离器的三通部件的栅元体积对自然循环的流动稳定性起很大的作用。阀门部件的流动面积必须足够大以防止乏汽在阀门部件中,出现临界;三通部件中第二栅元的栅元体积也必须足够大来保证自然循环的流动稳定。出口乏汽的流量和蒸汽发生器内压力由阀门部件的附加阻力系数决定。当阀门部件的附加阻力系数大时,将引起出口乏汽流量的减小和蒸汽发生器内压力的增大;反之,将引起流量的增大和压力的减小。另外,作者还对自然循环蒸汽发生器的循环倍率进行了调试,得出了蒸汽发生器的循环倍率随循环回路的附加阻力系数的增大而减小的结论。

TRAP 程序是 TRAC-PFI 程序包中的绘图程序,TRAC-PFI 程序的计算可产生一个数据文件 TRCGRF,这一数据文件经 Excov 程序作用后,变为 compij 数据文件。TRAP 程序可以利用 CoMPIj 作为其输入的数据文件来作出所需的图形。作者在 CyBER 计算机上对 TRAP 程序进行了开发研究。工作表明,虽然 TRAP 程序可以在 CyBER 计算机上编译通过,但在连接 TRAP 程序时却发现缺许多外部调用子程序和外部调用函数。经研究发现,大部分外部调用子程序和全部外部调用函数都来自绘图系统 DISSPLA,但仍有部分外部调用子程序得不到满足。经调研,发现这些外部调用子程序出自 CDC 7600 计算机的 LTSS/FTU 操作系统,由于国内目前还没有这一操作系统,因此,TRAP 程序的开发工作暂时不能继续下去。

为此,我们开发了一个新的绘图功能。首先改变 TRAC-PFI 程序,使其能输出一个新的数据文件 PLDAT,TRANS 程序可将数据文件 PLDAT 变为新的数据文件 DATA。接着我们可以利用已有的绘图程序 PLOT 作出所需的曲线。

本文的工作进一步完善了 TRAC-PFI 程序的功能,为今后对核电站二回路给水丧失等事故的安全分析提供了宝贵的调试经验;另外,本文的工作为今后更方便、更准确地分析 TRAC-PFI 程序的计算结果提供了可能。

答辩日期: 1989 年 6 月 10 日

提斗核子秤研制

核物理专业研究生 阮海波 指导教师 冯志潜

提斗核子秤是一种专门用于斗式提升机的数字式在线计量装置。依据物质对 γ 射线吸收原理, 采样非接触式测量, 不受提斗运动、震动和物料形态、温度的影响。具有显示、打印瞬时流量和累计输送量等多种功能。能广泛应用于多种工业部门, 具有明显的经济效益和社会效益。

提斗核子秤采用专门为核子秤设计的大型电离室作为物料传感器, 采用占流恒磁测速电机做测速传感器。物料信号和速度信号经电缆传给主机。主机采集物料信号和速度信号, 计算物料的流量和输送量。

主机是一台专门设计的单板机, CPU 为国际流行的 MC6809。单板机上装有数采模块, 各路信号共用一个 ADC(AD574); 有 18K 只读存储器 and 掉电保护的 8K 随机存储器; 采用 LSI 器件 INTEL8279 控制专用键盘和 8 位 LED 显示器; 设有打印接口, 可外接行式打印机; 可编程定时器 MC6840 提供采样定时脉冲和计时脉冲。提斗核子秤软件用 6809 的汇编语言和 PASCAL 语言写成, 约 16K 字节。

经过一年的研制, 先后在三个水泥厂进行了样机的安装, 调试和运行。试验结果表明方案是可行的。

答辩日期: 1988 年 12 月 3 日

γ 相机 ^{99m}Tc 特丁基异脒心肌灌注图像的计算机处理

核物理专业研究生 王 忠 指导教师 赵希德 金永杰

^{99m}Tc 标记的特丁基异脒 (TBI) 是美国在 1984 年首先提出的, ^{99m}Tc 的 r 射线能量适中, 而且极易获得, 目前我们在该示踪剂的药物制备, 标记及临床试用方面的工作已达国际水平。但 ^{99m}Tc -TBI 心肌灌注图像的缺点是它们的本底干扰严重, 噪声大, 因而给图像的计算机处理带来困难, 医学信息的提取和处理技术较复杂。因此对 ^{99m}Tc -TBI 心肌灌注图像进行特殊方法的计算机处理对临床来说是必不可少的。

本课题是国家自然科学基金资助项目。论文详细分析了 ^{99m}Tc -TBI 心肌灌注图像的特点, 及由于 ^{99m}Tc -TBI 和 ^{201}Tl 药物的生理生化特性不同而对二者图像的影响, 应用数字图像处理方法, 采用合适数学模型, 对 ^{99m}Tc -TBI 心肌灌注图像处理及提取医学信息的定量参数方法进行了探讨。论文分析了心肌灌注图像的特点及对示踪剂的

要求, 并对 ^{99m}Tc 。与其它几种用于心肌灌注图像的放射性同位素进行了比较, 比较了 ^{99m}Tc —TBI 和 ^{201}Tl 的内照射辐射吸收剂量。在对心肌灌注图像方面作了各种去统计噪声处理, 包括邻域平滑法和各种低通滤波器法——理想低通滤波器, 巴特沃思滤波器, 指数低通滤波器。在心肌图像本底减除方面, 针对图像特点, ^{99m}Tc 。特丁基异腈心肌灌注图像存在很高的肝放射性计数本底, 设计了 x^2 和 $\exp[-(r/r^0)^2]$ 函数曲线来模拟肝本底, 在原有减本底的方法上, 发展了 45° 矩形区插入法本底减除和环形径向插入法本底减除, 对 ^{99m}Tc —TBI 心肌图像取得了非常好的效果。对处理好的心肌图像作了两种定量参数计算: 线性段面计数曲线, 分析心肌左室图像果水平放射性计数, 比较室间隔和心肌后侧壁的计数值, 判断有无心肌缺损。周边放射性计数曲线, 描述心肌左室的一周放射性计数变化, 生成随角度变化的计数曲线。由于 ^{99m}Tc —TBI 心肌灌注图像有很高的计数率, 因此我们对之进行了心肌门电路造影, 并对门电路序列图像进行了富立叶分析, 在图像中每点的时间放射性计数曲线用余弦函数描述, 生成一个幅度值, 一个相位值, 幅度值表示该点的放射性计变化, 相位值表示各点的协调性。由各点的幅度值和相位值可分别生成幅度功能图和相位功能图, 在临床中可提供更加可靠的信息, 提高临床诊断的准确性。

答辩日期: 1988 年 12 月 6 日

γ 相机数据采集软件及硬件的研究

核物理专业研究生 丁爱莲 指导教师 赵希德

论文包括两部分。第一部分介绍了一个临床采集软件, 第二部分介绍了一种滑尺法道宽均匀器。

临床采集软件是针对 GUS-86 γ 相机—计算机数据采集与处理系统的临床使用而配备的。它采取适当的方式设置各种采集参数, 控制硬件部分运行, 并将获得的数据存储到磁盘文件中。临床采集软件作为硬件系统与用户的桥梁, 应具有使用方便, 与用户友好的特点; 它作为一种文件管理系统, 应负责起自动生成文件的任务, 并使文件具有适当的结构; 此外, 它应辅助硬件部分, 充分利用硬件资源, 使系统功能更加完备。数据文件名需要具有独特性和直观性。

数据文件包括四部分: 基本信息块, 索引块, 采集参数块和图象数据。基本信息块包括图象文件标志、处理标志、图象的帧数、点阵以及数据存储模式。处理标志的设置可使原始数据文件不受到破坏。基本信息块以二进制数形式放在文件的首部, 可以方便地取出, 直接供其它处理软件使用。

临床采集软件采用菜单形式设置参数。这是一种全屏编辑式菜单。它把全部内容集中在一页菜单上, 参数缺省及参数长度自然地放在参数要填入的位置上, 且提供了一

系列编辑功能键。这种菜单具有内容紧凑、形式美观、操作方便等优点。

软件还根据临床需要提供了两种缺省参数即原始缺省和临时缺省。此外软件还增加了一个很重要的功能,即实时显示功能。

滑尺法道宽匀器是为改善逐次二进制比较法 ADC 的微分非线性而设计的。12 位 ADC 用高 8 位作为道地址,测量微分非线性典型值在 16.5% 左右,道宽呈带状分布。微分非线性计算如下: (最大道宽 - 最小道宽) / 平均道宽。

均道器依据下述原理: 滑尺长度为 m 的均道器将使微分非线性改善 m 倍。实际设计的均道器包括计数器、DAC 以及减法电路。计算器用于产生周期变化的移道码 m , 每次事件结束改变一次, DAC 产生移道电平 mH , H 为 ADC 道宽, 减法器实现移道码的扣除。测量证明 16 道均道器可使微分非线性改善六至八倍。

m 道均道器将使最末 m 道道宽发生畸变, 为此尝试了对准 ADC 第十位均道而仍取高 8 位测量的方法, 结果与前一种相差不大。

答辩日期: 1989 年 12 月 6 日

γ 谱分析中一些新方法的研究和应用

核物理专业研究生 侯建华 指导教师 王经瑾

在核物理实验中, 多道分析系统的应用已越来越广泛了。在多道分析系统中, 能谱分析是一个非常重要的, 必不可少的组成部分。本文中介绍了几种用于 γ 能谱分析中的新方法, 并对每种方法做了性能检验, 将它们实际应用于谱分析之中。

一般的 γ 谱分析可分为两个阶段, 即峰分析和核素的识别与定量计算。本文中讨论的三种方法分别用于这两个阶段之中。

本文中介绍的第一种方法是利用相关线技术进行核素识别和定量分析计算。和一般常用的方法相比, 该法的原理简单明了, 而且少用了一个峰分析库, 为分析过程带来了许多方便。在核素检索过程中, 该法采用了可信度进行判别, 提高了分析的可靠性。经实际检验, 其运算精度是令人满意的。

第二种方法是实验峰形拟合, 就是用实际测得的峰形作为标准, 进行谱的拟合分析。这种方法为复杂情况下的谱分析提供了一种手段。当实际测得的峰形不能用常用标准函数描述时, 更显出其优越性。在各种情况下, 这种方法都能得到好的结果。

文中介绍的第三种方法是最佳一致逼近拟合, 即是将最佳一致逼近标准用于拟合之中。这里利用蒙特卡罗方法进行计算。文中对这样计算的结果与最小二乘法的结果进行了比较, 可以看出, 计算精度有所改进。

这些方法的研究充实了现有的 γ 谱分析办法, 将它们应用于实际谱分析中, 增强了谱处理的能力。

答辩日期: 1988 年 12 月 6 日

碳氧比能谱测井仪地面微机通讯接口

核物理专业研究生 王均勇 指导教师 汪人透

测井电缆的通讯一直是测井技术的一个关键, 通讯质量的好坏直接影响着测井的结果。由于数字传输方式比之模拟传输方式有如下优点: 信息量大, 速度快, 抗干扰能力强, 所以它大有取代模拟传输方式之势。目前国内在这方面做的工作还远远不够, 远不能满足要求, 本文工作的目的就是在这方面解决一些实际的问题, 为碳氧比能谱测井仪设计一个地面微机通讯接口。

考虑到与现在应用较广泛的 Atlas 3700 CLS 数控测井设备的兼容, 本接口是在消化吸收 CLS 的 375-6 号极电路的基础上设计而成的, 以目前应用非常广泛的微机 IBM-PC/XT 为主机, 对井下的 C/O 能谱测井仪进行监控, 收集井下多道的能谱数据。接口采用抗干扰能力很强的 Manchester 码与井下进行数字通讯, 通讯率由软件调节, 最高可达每秒 80 千位 (目前配接 COPJ-A 型 C/O 测井仪, 使用 20kB/s 的通讯率)。接口设有 $2K \times 16$ 位的缓冲存储器, 用于缓存将要发往井下的数据和刚接收到的来自井下的数据, 主机不参与接口与井下的通讯过程, 以中断的方式从接口获取能谱数据。接口设有一采样中断产生电路, 可产生 0~15 秒的中断信号 (由软件设定), 主机就在这个中断的控制下工作。接口上还有 3 个 8 位的 D/A 变换器, 用于处理结果的模拟量输出, 以便记录仪实时记录。

本接口具有通用性, 适用于各种以这种格式的 Manchester 码传输的测井仪器, 由于具有与 CLS 系统的兼容性, 它在研制、调试测井仪和进行现场能谱测井等方面都能发挥很大作用。

本接口电路全部调试通过, 完全达到设计要求。但还未经现场测井的检验, 有待于在实践中完善。

答辩日期: 1988 年 12 月 10 日

工业 CTBGO 闪烁探测器系统的设计和研制

核物理专业研究生 张玉强 指导教师 钱永康

工业 CT (Computed Tomography) 是一种先进的无损检测技术。它是利用射线和物质的相互作用原理, 通过信号检测处理和计算机图象重建技术再现物体的断层图象, 从而达到无损检测的目的。工业 CT 可以应用在精密机械, 航空航天和军工等广大产业部门, 目前美国和日本等国已制造出实用的工业 CT 商品。