

快堆闭式回路自然循环流量的快速计算分析

刘佳¹, 苏振菲², 姚波¹, 吴碗烨¹, 方圆¹, 贾兴亮¹, 娄亚娟¹, 刘红朝¹, 汤青松¹

¹武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉

²中国核电工程有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月9日; 录用日期: 2025年7月22日; 发布日期: 2025年8月20日

摘要

快堆一回路采用闭式回路, 固有安全设计要求考虑回路具有足够的自然循环能力, 从而实现非能动安全功能(如余热排出、失流事故等)。传统CFD方法计算消耗资源高, 难以满足快速迭代设计需求, 迫切需要一种简化的快速计算快堆闭式回路自然循环的方法。本文针对液态金属冷却介质矩形闭合回路单相自然循环流动特点, 建立了自然循环流量计算通用数学物理模型, 并利用国际上NACIE铅基冷却自然循环试验数据进行了模型验证, 表明所采用的模型可以满足快速计算分析要求。同时, 研究了不同加热功率对自然循环流量的影响并拟合了自然循环流量和功率经验关系式。

关键词

液态金属堆, 自然循环, 稳态流, 快速计算

Rapid Analysis of Natural Circulation Flow Rate in Fast Reactor Closed-Loop Circuits

Jia Liu¹, Zhenfei Su², Bo Yao¹, Wanye Wu¹, Yuan Fang¹, Xingliang Jia¹,
Yajuan Lou¹, Hongchao Liu¹, Qingsong Tang¹

¹Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan Hubei

²China Nuclear Power Engineering CO., Ltd., Beijing

Received: Jul. 9th, 2025; accepted: Jul. 22nd, 2025; published: Aug. 20th, 2025

Abstract

The primary circuit of the fast reactor adopts a closed circuit, and the inherent safety design requires that the circuit has sufficient natural circulation capacity to realize passive safety functions (such as waste heat discharge, flow loss accidents, etc.). The traditional CFD method consumes high resources and is difficult to meet the needs of rapid iterative design, so there is an urgent need for

文章引用: 刘佳, 苏振菲, 姚波, 吴碗烨, 方圆, 贾兴亮, 娄亚娟, 刘红朝, 汤青松. 快堆闭式回路自然循环流量的快速计算分析[J]. 电力与能源进展, 2025, 13(4): 218-225. DOI: 10.12677/aepe.2025.134022

a simplified method to quickly calculate the natural circulation of fast stacked closed loops. According to the characteristic of single-phase natural circulation flow in a closed loop for liquid metal cooling media, a general mathematical and physical model for calculation natural circulation flow was established. The model was validated using international NACIE lead based cooling natural circulation test data. The results showed that, the model can meet the requirements of quickly calculation and analysis. At the same time, the influence of different heating powers on natural circulation flow rate was studied and an empirical relationship between natural circulation flow rate and power was fitted.

Keywords

Liquid Metal Reactor, Natural Circulation, Steady State Flow, Fast Calculation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

快堆(钠冷快堆或铅基快堆)采用闭式燃料循环,在核燃料高效利用方面具有不可替代的卓越优势,可将铀资源利用率提升至 60%以上。我国快堆发展战略是核能“三步走”(热堆→快堆→聚变堆)的核心环节,旨在解决铀资源瓶颈、核废料处理及能源自主问题。快堆通过嬗变技术将铀资源利用率从热堆的 1% 提升至 60%以上,使全球铀矿理论支撑年限从数百年延长至超万年,理论上有望消除核燃料供应瓶颈。

自然循环作为一种非能动技术,因温度差引起密度差,继而产生相对势能形成循环流动。在封闭的闭合回路里,通过合理布置热源和冷源的位置,在加热段和冷却段形成流体密度差,从而形成驱动压头,并克服系统流动阻力,即可形成稳定的自然循环。自然循环利用冷却剂密度差驱动流动,无需机械泵,可避免停电事故导致的堆芯熔毁风险。自然循环在很多工业领域均有应用,特别是在核能利用、锅炉循环、太阳能利用等方面。第四代核能技术中,采用液态铅基金属冷却剂的快堆充分利用自然循环作为其固有安全手段。铅基冷却剂(如 LBE 合金)密度是水的 10 倍以上,在相同温差下产生更大驱动力,被公认为设计高安全性快堆的理想选择。小型模块化铅冷快堆 SNCLFR-10 (10 MW)完全依赖自然循环运行,其设计参数显示循环高度仅需 2 m 即可驱动较大的质量流量[1]。

在快堆自然循环研究方面,文献[2]认为快堆设计必须具有非能动安全特征,不依赖外界机械或电力而依靠自然规律和材料特性完成其安全功能,为了准确计算快堆自然循环能力,文章作者开发了自然循环和衰变热计算程序 DHRSC;文献[3]研究了池式快堆自然循环模拟实验的模拟准则,根据准则和自然循环方程式,对池式快堆自然循环模拟实验装置几何与热工设计参数进行了计算,研究了模型比例、温差和阻力系数等对相似准则数的影响,确定了模拟实验装置的设计参数范围,从理论上解决了池式实验快堆自然循环模拟实验装置的模拟问题;文献[4]为了探索自然循环铅铋冷却快堆的自然循环与固有安全特性,用基于中子学与热工水力学耦合方法的安全分析程序 NTC-2D 对 10MW 自然循环铅铋冷却快堆的无保护失热阱和有保护失热阱工况分别进行了模拟与分析,结果表明该反应堆具有良好的自然循环与固有安全特性;文献[5]用 Fluent 程序对钠冷快堆乏燃料组件自然循环冷却瞬态过程进行了三维数值模拟,结果表明乏燃料组件棒束区温度在轴向呈现中心高、边缘低的分布特征,乏燃料组件处于氩气中的时间不宜超过 6 min;文献[6]用 RELAP5 程序建立了 100 MW 级小型自然循环铅冷快堆(SNCLFR-100)一回路冷却系统模型,进行初始稳态运行、有/无保护超功率失热阱并发、有保护超功率失热阱并发事故进行瞬态

安全分析,验证了该新型反应堆良好的自然循环特性与固有安全性;文献[7]基于系统分析程序 ATHLET 建立了 100 MW 小型自然循环铅冷快堆一回路主冷却系统分析模型,对超功率、失热阱和超功率叠加失热阱三类典型无保护事故分别进行了研究;文献[8]在系统介绍小型自然循环铅基快堆的技术特点和研究现状的基础上,开展 100 MWt 级小型自然循环铅基快堆无保护事故分析,深入探讨在极端假设事故工况下小型自然循环铅基快堆的固有安全性;文献[9]为深入研究影响自然循环铅基快堆一回路系统驱动力的关键因素,以自然循环铅基快堆 SNCLFR-10 为研究对象构建描述反应堆一回路自然循环稳态运行模型,从理论上量化分析冷/热池的热量传递、热源和热阱温度非线性分布、反应堆压力容器壁散热 3 种因素对自然循环能力的影响,并开展了相关数值模拟验证,结果表明数值模拟结果与本研究理论计算值吻合较好;文献[10]为进一步探究铅铋合金的自然循环流动传热特性,基于自然循环理论分析,对比研究了铅铋自然循环稳态流动与输传热行为规律与特点,基于铅铋自然循环瞬稳态实验,对快堆系统分析程序 FRTAC 模拟铅铋瞬、稳态自然循环的适宜性进行了初步验证;文献[11]开发了“一维系统 + 三维 CFD”耦合方法,用于快堆非能动余热排出系统自然循环特性计算分析;文献[12]基于典型池式钠冷大功率快堆的堆内自然循环设计,采用 ERAC 程序对两组 4 种不同事故余热排出系统输入条件下,反应堆在紧急停堆后堆内的自然循环余热排出特性进行分析。

上述计算方法过于复杂,CFD 数值模拟和系统程序耗费的计算机资源多,校核计算所涉及的软件购买和计算服务成本费用高昂,需要系统完成初步设计的前提下才具备开展分析验证的前提,并且需要多次迭代才能确定,不利于工程设计人员在短时间内确定系统设计方案。本文立足于正向设计,结合快堆一回路闭合回路自然循环原理,根据正向设计理论经验公式,建立了可快速估算液态金属冷却介质自然循环稳态流量的模型,并采用 ENEA(意大利国家新技术、能源和可持续经济发展机构)铅基试验回路 NA-CIE 的试验数据对本文所建立的快速分析简化模型进行了验证[13]。

2. 模型与方法

快堆闭合回路自然循环系统原理简化示意图如图 1 所示。

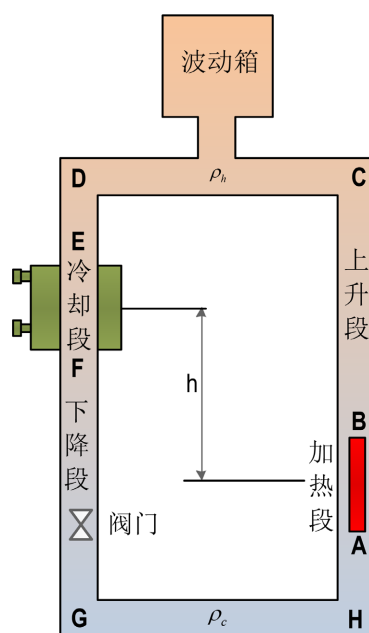


Figure 1. Closed loop NC diagram
图 1. 闭合回路自然循环原理图

从图 1 可以看出, 闭合回路自然循环回路由加热段 AB、上升段 BC、顶部水平段 CD、波动箱、顶部过渡段 DE、冷却段 EF、下降段 FG、底部水平段 GH 和入口段 HA 组成。管内介质在加热段 AB 受热后温度升高、体积膨胀, 导致密度减小; 在 EF 冷却段, 管内介质被冷却后温度降低、体积缩小, 导致密度增大; 受重力影响, BC 段热流体上升、FG 段冷流体下降, 下降段产生的提升压降的绝对值比上升段产生的提升压降的绝对值大, 其差额部分就形成了回路介质流动的驱动压头, 该压头克服回路阻力, 即可形成稳定的自然循环流动。

对图 1 所示矩形自然循环闭合回路进行稳态计算模型分析。

流动回路的总压降一般包括四部分: 加速压降、摩擦压降、局部压降和提升压降, 即:

$$\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_f + \Delta p_c + \Delta p_{el} \quad (1)$$

由于稳定闭合回路的自然循环总压降为零($\Delta p = 0$), 加速压降为零($\Delta p_a = 0$), 上述公式可简化为:

$$\Delta p_f + \Delta p_c + \Delta p_{el} = 0 \quad (2)$$

根据图 1 所示, 上述各部分的压降计算公式为:

$$\Delta p_f = \Delta p_{f,AB} + \Delta p_{f,BC} + \Delta p_{f,CD} + \Delta p_{f,DE} + \Delta p_{f,EF} + \Delta p_{f,FG} + \Delta p_{f,GH} + \Delta p_{f,HA} \quad (3)$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{c,A} + \Delta p_{c,B} + \Delta p_{c,C} + \Delta p_{c,D} + \Delta p_{c,E} + \Delta p_{c,F} + \Delta p_{c,G} + \Delta p_{c,H} \quad (4)$$

$$\Delta p_{el} = \Delta p_{el,HA} + \Delta p_{el,AB} + \Delta p_{el,BC} + \Delta p_{el,DE} + \Delta p_{el,EF} + \Delta p_{el,FG} \quad (5)$$

假定上升段和下降段介质密度分别为 ρ_h 、 ρ_c , 加热段和冷却段的垂直高度差为 h , 则提升压降计算公式 Δp_{el} 可进一步简化为:

$$\Delta p_{el} = -(\rho_c - \rho_h)gh \quad (6)$$

定义自然循环的驱动力为 Δp_d , 则有:

$$\Delta p_d = -\Delta p_{el} = (\rho_c - \rho_h)gh \quad (7)$$

定义自然循环的总阻力为 Δp_r , 则有:

$$\Delta p_r = \Delta p_f + \Delta p_c = \sum_i \Delta p_{f,i} + \sum_i \Delta p_{c,i} \quad (8)$$

于是, 公式(2)可简化为:

$$(\rho_c - \rho_h)gh = \sum_i \Delta p_{f,i} + \sum_i \Delta p_{c,i} \quad (9)$$

公式(9)即为求解回路自然循环稳态流量的计算公式。

此外, 为获得热段的温度或密度, 还需用到能量守恒方程:

$$Q = mc_p(t_h - t_c) \quad (10)$$

公式(10)中的 Q 表示加热功率, m 表示质量流量, c_p 表示定压比热容, t_h 、 t_c 分别表示加热段出口、入口介质温度。

摩擦压降 Δp_f 计算公式为:

$$\Delta p_f = f \frac{L}{de} \frac{\rho u^2}{2} \quad (11)$$

公式(11)中的 L 表示流动长度, de 表示流道的当量直径, ρ 表示密度, u 表示流速, f 表示摩擦系数(与雷诺数 Re 有关), 具体计算公式为:

- 1) 对于层流: $f = 64/Re$;
- 2) 对于湍流: $f = 0.3164/Re^{0.25}$ 。

局部压降 Δp_c 计算公式为:

$$\Delta p_c = \zeta \frac{\rho u^2}{2} \quad (12)$$

公式(12)中的 ζ 表示局部损失系数, 计算公式为:

- 1) 对于内径大于 60 mm 的 90°弯管: $\zeta = 0.55$;
- 2) 对于流通面积突扩(如 A_1 截面突扩到 A_2): $\zeta = (1 - A_1/A_2)^2$ 。
- 3) 对于流通面积突缩(如 A_1 截面突缩到 A_2): $\zeta = 0.5(1 - A_2/A_1)$ 。
- 4) 对于阀门、节流部件可参考流体力学相关图书推荐值(1~200)。

对于液态流体, 需用到物性参数(定压比热容、密度、动力粘度)计算公式, 选择手册推荐的经验公式[14]。

稳态自然循环流量计算需要采用多次迭代计算, 计算流程图见图 2 所示, 具体步骤如下:

- 1) 进行回路几何参数计算, 包括流通面积、当量直径、局部损失系数等;
- 2) 确定初始热工输入参数, 包括压力、加热段入口温度, 同时进行初始状态参数计算, 包括比热容、冷段密度;
- 3) 假定回路自然循环流量值 m_0 , 计算得到各分段流速; 根据热量平衡计算加热段出口温度, 并根据物性参数公式计算热段密度、平均动力粘度, 计算平均雷诺数;
- 4) 根据冷、热段密度值, 计算驱动压降 Δp_d ;
- 5) 根据回路各段密度值、流速值、局部阻力系数值计算局部总压降 Δp_c ;
- 6) 根据摩擦系数、流动长度、当量直径、各段密度值、流速值计算总摩擦压降 Δp_f ;
- 7) 根据 5)、6) 计算总阻力压降 Δp_r ;
- 8) 根据 4)、7) 计算驱动力和总阻力压降之差 $\Delta p_d - \Delta p_r$, 并根据偏差正负, 修正回路自然循环流量值 m_0 , 直至 $\Delta p_d - \Delta p_r < 0.01 \text{ Pa}$, 从而得到稳态自然循环流量 m 。

自然循环稳态流量迭代计算流程如图 2 所示。根据图 2 所示流程及上述模型开发计算机程序(如图 3 所示), 可实现快速计算分析需求。

3. 结果与讨论

为验证闭合矩形回路自然循环流量计算模型的准确性, 选择文献[13] NACIE 的试验数据进行验证, NACIE 为铅基液态金属冷却热工水力试验回路, 主要用于测试和验证液态金属冷却介质的自然循环, 表 1 给出了本简化模型计算得到的自然循环流量和试验测得的流量对比结果, 可见本简化模型与试验值比较接近, 相对误差在 $\pm 3\%$ 以内。满足工程设计误差范围要求。

维持冷却段冷却流量和边界条件不变, 调整加热功率范围(10~200 kW), 研究加热功率与自然循环流量之间的变化规律, 如图 4 所示。根据曲线数据进行公式拟合, 可得到自然循环流量 m 与加热功率 Q 之间的函数关系式(拟合优度 $R^2 = 1$)如下。注意, 该公式适用于 NACIE 实验装置的功率与自然循环流量关系, 根据实验数据可得到流量的不确定性范围($\pm 3\%$ 左右)。在具体应用时需要结合回路布置方式, 利用上述模型快速估算适用于具体某实验装置的自然循环流量与功率关系式。

$$m = 0.6929Q^{0.3497}$$

本模型仅考虑了稳态流动情况下自然循环功率和流量之间的关系, 模型基于工程流体力学和传热学

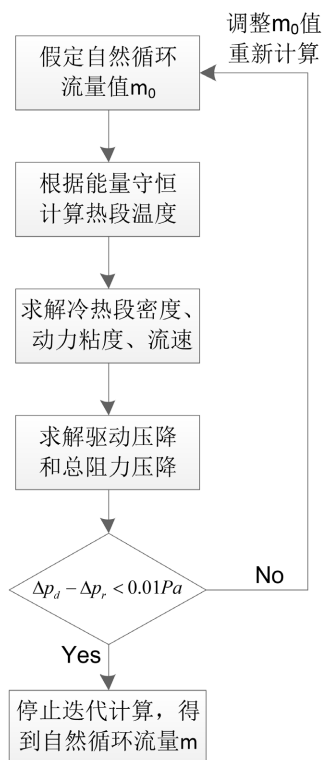


Figure 2. Flow chart for iterative calculation of steady state flow of natural circulation
图 2. 自然循环稳态流量迭代计算流程图

NC稳态流量计算程序

说明:
1) 本程序适用的流体介质为Pb-Bi;
2) 本程序适用于常压环境;
3) 用于稳态自然循环NC流量计算。

1.几何参数计算

管道当量直径d _{gd}		m
加热段当量直径d _{jrd}		m
冷却段当量直径d _{lqd}		m
管道流通面积A _{gd}		m ²
加热段流通面积A _{jrd}		m ²
冷却段流通面积A _{lqd}		m ²
冷却器垂直高度差h		m
AB段流动长度L _{AB}		m
BC段流动长度L _{BC}		m
CD段流动长度L _{CD}		m
DE段流动长度L _{DE}		m
EF段流动长度L _{EF}		m
FG段流动长度L _{FG}		m
GH段流动长度L _{GH}		m
HA段流动长度L _{HA}		m

2.状态参数计算

[输入] NC流量假设值m		kg/s
[输入] 加热段热功率Q		W
[输入] 下降段温度t _c		°C
回路工作压力P		MPa
流体比热容c _p		J/(kg·K)
上升段流体温度t _h		°C
回路平均温度t _{avg}		°C
下降段流体密度p _c		kg/m ³
上升段流体密度p _h		kg/m ³
流体平均密度p _{avg}		kg/m ³
加热段AB流速u _{jrd}		m/s
上升段BCDE流速u _{ssd}		m/s
冷却段EF流速u _{lqd}		m/s
下降段FGHA流速u _{xjd}		m/s
平均动力粘度μ		Pa·s
加热段AB雷诺数Re _{jrd}		
上升段BCDE雷诺数Re _{ssd}		
冷却段EF雷诺数Re _{lqd}		
下降段FGHA雷诺数Re _{xjd}		

3.沿程摩擦阻力计算

AB段阻力系数f _{AB}		Pa
AB段摩擦阻力dP _{AB}		Pa
BC段阻力系数f _{BC}		Pa
BC段摩擦阻力dP _{BC}		Pa
CD段阻力系数f _{CD}		Pa
CD段摩擦阻力dP _{CD}		Pa
DE段阻力系数f _{DE}		Pa
DE段摩擦阻力dP _{DE}		Pa
EF段阻力系数f _{EF}		Pa
EF段摩擦阻力dP _{EF}		Pa
FG段阻力系数f _{FG}		Pa
FG段摩擦阻力dP _{FG}		Pa
GH段阻力系数f _{GH}		Pa
GH段摩擦阻力dP _{GH}		Pa
HA段阻力系数f _{HA}		Pa
HA段摩擦阻力dP _{HA}		Pa

4.局部阻力计算

A处局部阻力系数ξ _A		Pa
A处局部阻力dP _A		Pa
B处局部阻力系数ξ _B		Pa
B处局部阻力dP _B		Pa
C处局部阻力系数ξ _C		Pa
C处局部阻力dP _C		Pa
D处局部阻力系数ξ _D		Pa
D处局部阻力dP _D		Pa
E处局部阻力系数ξ _E		Pa
E处局部阻力dP _E		Pa
F处局部阻力系数ξ _F		Pa
F处局部阻力dP _F		Pa
G处局部阻力系数ξ _G		Pa
G处局部阻力dP _G		Pa
H处局部阻力系数ξ _H		Pa
H处局部阻力dP _H		Pa
阀阻力系数ξ _{valve}		Pa
阀局部阻力dP _{valve}		Pa

5.驱动力和总阻力计算

驱动力计算dP _{qdl}		Pa
总阻力计算dP _{zzl}		Pa
驱动力与总阻力绝对误差dP _{Error}		Pa
驱动力与总阻力相对误差rel _{Error}		%

点击计算!

Figure 3. Computer code for flow calculation of steady state flow of natural circulation
图 3. 自然循环稳态流量计算机程序

Table 1. Comparison between models calculated values and experimental values
表 1. 本模型计算值与试验值对比

试验工况	模型计算值(kg/s)	试验值(kg/s)	绝对误差(kg/s)	相对误差(%)
NAT-1	1.59	1.55	0.04	2.6
NAT-2	2.03	2.06	0.03	1.5
NAT-3	2.34	2.41	0.07	2.9

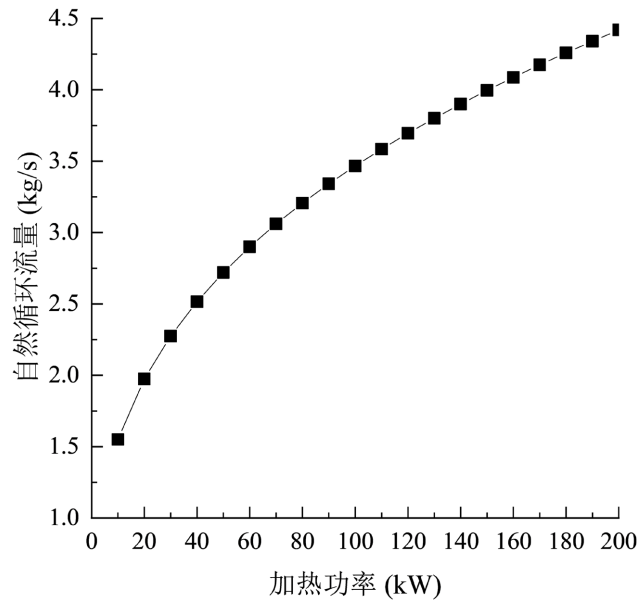


Figure 4. Relation curve between heating power and natural circulation flow rate
图 4. 加热功率与自然循环流量的关系曲线

理论,并未考虑瞬态情况(如耦合控制系统作用下的变负荷瞬态情形、复杂的流动形式和传热模式等)的多种影响因素的作用,具有一定的局限性。但本模型可有助于工程设计人员快速确定回路的自然循环参数,并根据设计需求实现最优回路布置方式。

4. 结论

本文针对液态金属冷却介质闭合回路单相自然循环流动的特点,建立了通用自然循环稳态流量计算数学物理模型,利用 NACIE 自然循环试验数据进行了模型验证,结果表明:

- 1) 本文的简化分析模型可以满足分析要求,计算值与试验值的相对误差在 $\pm 3\%$ 以内;
- 2) 利用本文模型研究了不同加热功率对自然循环流量的影响,并拟合了自然循环流量和功率经验关系式,可用于类似闭合回路液态金属介质自然循环流量初步估算;
- 3) 本文提出的简化计算模型可用于快堆概念设计阶段的一回路(池式或回路式)参数扫描,可根据回路具体流动路径更新上述模型,满足更多不同类型装置的自然循环设计计算;
- 4) 本计算模型还可作为快堆初步安全分析中的边界条件估算、复杂 CFD 模拟初始条件和边界条件试算,同时可作为后续设计阶段对设计验证参数校验的依据。

作者贡献与利益声明

刘佳:作为第一作者,负责论文的整体构思、框架设计、数据分析及主要内容的撰写,并对最终稿

件进行了全面修订和定稿。

苏振菲：参与研究方法的设计与优化，负责部分实验数据的收集与初步处理。

姚波：负责文献综述的整理与撰写，对国内外相关研究成果进行了系统梳理，为研究提供了理论支撑。

吴碗烨：承担了数据采集工作，确保了准确性和可靠性。

方圆：负责数据分析软件的应用与复杂数据的统计分析，为研究提供了关键的数据支持，参与了论文中数据分析方法的描述与结果解释部分。

贾兴亮：负责数据采集工作，进行了详细校核。

姜亚娟：初稿进行了细致地校对与修改建议。

刘红朝：参与论文的讨论与修改过程，提供了宝贵的学术见解与建议，并对部分章节进行了语言润色。

汤青松：负责论文的整体协调与对外沟通，包括与期刊编辑的交流、审稿意见的回复等，同时对论文的学术规范性进行了最终审核。

本论文所有作者均声明，本研究在开展过程中未受到任何可能影响研究公正性的外部资助或利益关联。本研究的设计、实施、数据分析及论文撰写均基于学术诚信原则，旨在促进科学知识的交流与进步。本文承诺，本文全部署名真实有效，无任何个人或团体利益冲突。

参考文献

- [1] 翟鹏迪, 朱恩平, 赵鹏程, 王天石, 于涛. 自然循环铅基快堆一回路系统驱动力的关键影响因素研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(3): 66-73.
- [2] 陈逸少, 蒋帆, 殷浩松. 实验快堆自然循环和衰变热排出系统计算程序 DHRSC[J]. 原子能科学技术, 1991(5): 85-89.
- [3] 陈海燕. 实验快堆自然循环模拟实验装置的模拟原理及其参数计算[J]. 核动力工程, 1997(5): 50-56.
- [4] 辜峙铎, 宋勇, 王刚, 等. 自然循环铅铋冷却快堆失热瞬态研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(S1): 161-166.
- [5] 周志伟, 杨红义, 冯预恒, 等. 钠冷快堆乏燃料组件自然循环冷却瞬态过程的数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(10): 1806-1812.
- [6] 石康丽, 张喜林, 陈红丽. 小型自然循环铅冷快堆超功率失热瞬态分析[J]. 核动力工程, 2017, 38(4): 1-5.
- [7] 赵鹏程, 刘紫静, 于涛, 等. 自然循环铅冷快堆无保护瞬态分析研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2018, 32(3): 18-26+64.
- [8] 陈钊, 石康丽, 张勇, 等. 小型自然循环铅基快堆固有安全性分析研究[J]. 核科学与工程, 2019, 39(3): 430-439.
- [9] 翟鹏迪, 朱恩平, 赵鹏程, 等. 自然循环铅基快堆一回路系统驱动力的关键影响因素研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(3): 66-73.
- [10] 王舒婷, 匡波, 王欣. 液态铅铋合金自然循环实验与数值模拟[J]. 应用科技, 2023, 50(4): 44-52+108.
- [11] 陆道纲, 宋海洁, 郭劲松, 等. 基于“一维系统 + 三维 CFD”耦合方法的快堆非能动余热排出系统自然循环特性的数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(9): 1833-1843.
- [12] 周志伟, 薛秀丽, 林超, 等. 池式钠冷快堆堆内自然循环余热排出设计研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(9): 1817-1824.
- [13] Barone, G., Forgone, N., Martelli, D. and Del Nevo, A. (2012) Pre-Test Analysis of Thermal-Hydraulic Behavior of the NACIE Facility for the Characterization of a Fuel Pin Bundle. ENEA Report.
- [14] 戎利建, 张玉妥. 铅与铅基共晶合金手册——性能、材料相容性、热工水力和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-67.