

Research on Reactor Power and Coolant Flow Coordinated Control

Yukun Yan¹, Fengyu Li¹, Yuan Wang², Kezhen Huang³, Jinliang Ye³

¹Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

²Unit 92537, Beijing

³Wuhan First Ship Design and Research Institute, Wuhan Hubei

Email: 617229251@qq.com

Received: Sep. 22nd, 2015; accepted: Oct. 10th, 2015; published: Oct. 20th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

In order to optimize the control of reactor coolant flow, a control strategy is presented. The reactor coolant flow can be changed on the basis of the steam pressure of evaporator in order to keep the steam pressure of evaporator steady. The ordinary differential mathematical model of controlled system is built. Traditional PID control is widely being used in the actual control engineering area, and the reactor power controller and the coolant pump speed controller are designed according to the current situation. These controllers are also expounded in detail. Controller parameters are ascertained according to the numerical calculation results of the whole closed-loop system when the aperture of steam valve step changes. The calculation results show that when the power control and flow control are input at the same time, the coolant flow follow-up changes control is superior to the coolant flow stay invariant.

Keywords

Coolant Flow, Reactor Power, Coolant Pump Speed, Controller Parameter

反应堆功率与冷却剂流量协调控制研究

晏玉坤¹, 李凤宇¹, 王元², 黄克震³, 叶金亮³

¹海军工程大学, 湖北 武汉

²92537部队, 北京

³武汉第一船舶设计院, 湖北 武汉

Email: 617229251@qq.com

收稿日期: 2015年9月22日; 录用日期: 2015年10月10日; 发布日期: 2015年10月20日

摘要

为优化反应堆冷却剂流量控制, 提出了根据蒸发器蒸汽压力适时地连续改变反应堆冷却剂流量, 以维持蒸发器蒸汽压力基本不变的控制策略。建立了被控对象的常微分数学模型, 并根据当前实际控制工程领域仍然广泛采用传统PID控制的现状, 设计了反应堆功率控制器和冷却剂泵转速控制器, 并对其进行了详细阐释。根据蒸汽阀门开度阶跃变化整个闭环系统数值计算结果, 确定了控制器参数, 计算结果表明: 当功率控制与流量控制同时投入, 冷却剂流量随动变化控制明显优于冷却剂流量固定不变的运行方式。

关键词

冷却剂流量, 反应堆功率, 冷却剂泵转速, 控制器参数

1. 引言

目前反应堆冷却剂流量控制通常是將冷却剂泵设置高、低两种不同转速 [1], 这种方式较简单易行, 当反应堆处于中、高负荷时, 冷却剂泵高速运行, 冷却剂系统保持全流量; 当反应堆处于低负荷时, 冷却剂泵低速运行, 冷却剂系统维持低流量。冷却剂泵由低速切换到高速过程中, 冷却剂流量相应地在短时间内迅速增加, 使冷却剂平均温度急剧下降, 由慢化剂温度效应和燃料多普勒效应带来的正反应性致使反应堆功率迅速上升, 甚至出现反应堆周期过短的现象; 冷却剂泵由高速切换到低速过程中, 冷却剂温度会升高得比较快, 对核燃料、堆结构的热应力影响比较大。如果能根据蒸发器蒸汽压力适时地连续改变反应堆冷却剂流量, 维持蒸发器蒸汽压力基本不变, 那么对反应堆、蒸发器来说都是有利的。一方面可以减少冷却剂温度的变化幅度, 减少对核燃料、堆结构的热应力影响; 另一方面有利于汽轮机系统运行, 便于蒸发器水位、汽轮机转速等参数的调节控制, 降低二回路阀门、管道承受压力的变化幅度 [2]。

2. 建立被控对象数学模型

建立被控对象数学模型是研究设计控制器的基础。为了简化问题并且抓住主要问题, 建立整个反应堆系统的集总参数常微分方程数学模型, 因为被控对象数学模型采用常微分方程, 对于控制器设计来说是足够的。

2.1. 反应堆中子动力学模型

采用六组缓发中子点堆动力方程 [3]

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}}{\Lambda} n(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + s \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t), (i = 1, \dots, 6) \quad (2)$$

其中, $n(t)$ 为中子密度; ρ 为反应性; $C_i(t)$ 为第 i 组先驱核浓度; λ_i 为第 i 组缓发中子先驱核衰变参数;

β_i 为第 i 组缓发中子有效份额； Λ 为中子代时间； β_{eff} 为总的缓发中子有效份额。

对于采用 U235 作为燃料的反应堆，中子代时间 Λ 取 10^{-4} ， $\beta_i = 0.00021, 0.00142, 0.00128, 0.00257, 0.00075, 0.00027$ ， $\beta_{eff} = 0.0065$ ，第 i 组缓发中子先驱核衰变参数 $\lambda_i = 0.0124, 0.0305, 0.111, 0.301, 1.14, 3.01$ 。

2.2. 反应堆热动力学模型

根据核燃料与冷却剂之间的传热关系，有：

$$P = (m_f C_f) \cdot \frac{dT_f}{dt} + KA_f (T_f - T_{av}) \quad (3)$$

其中： P 为反应堆功率，kW， $P = \alpha \cdot n$ ， α 为中子密度 n 与功率 P 之间的转换系数； m_f 为燃料元件的质量，kg， C_f 为燃料元件的定温比热，kJ/(kg·°C)， $(m_f C_f)$ 为燃料元件的热容量，kJ/°C； T_f 为燃料元件的平均温度，°C； T_{av} 为冷却剂的平均温度，°C； K 为燃料元件与冷却剂之间的传热系数，kW/(m²·°C)； A_f 为活性区内燃料元件的总有效传热面积，m²。

一般反应堆的 $KA_f \approx 40 \text{ kW/}^\circ\text{C} \sim 220 \text{ kW/}^\circ\text{C}$ 。另一方面，单位时间内燃料元件传递给冷却剂的热量等于冷却剂温度升高吸收的热量加上冷却剂带走的热量，因此有：

$$KA_f (T_f - T_{av}) = (m_w C_w) \cdot \frac{dT_{av}}{dt} + GC(T_h - T_c) \quad (4)$$

其中： G 为冷却剂流量，kg/s，为简单起见，令冷却剂流量 G 与冷却剂泵转速 v 成正比； C 冷却剂的定压比热，kJ/(kg·°C)； m_w 为燃料元件包壳的质量，kg， C_w 为燃料元件包壳的比热，kJ/(kg·°C)； $(m_w C_w)$ 为冷却剂和燃料元件包壳的热容量，kJ/°C； T_h 为反应堆冷却剂出口温度，°C； T_c 为反应堆冷却剂入口温度，°C。

显然还有：

$$T_{av} = \frac{1}{2}(T_h + T_c) \quad (5)$$

式(3)、式(4)、式(5)就是反应堆热动力学模型。

2.3. 蒸发器热动力学模型

根据冷却剂在蒸发器中的传热关系，有：

$$GC(T_{bi} - T_{bo}) = K_b \cdot A_b (T_b - T_s) \quad (6)$$

其中： K_b 为单位面积冷却剂与汽水混合物之间的传热系数，kW/(m²·°C)， A_b 为蒸发器内的总有效传热面积，m²， $K_b \cdot A_b$ 为冷却剂与汽水混合物之间的传热系数，kW/°C，一般反应堆的 $K_b A_b \approx 50 \text{ kW/}^\circ\text{C} \sim 400 \text{ kW/}^\circ\text{C}$ 。； T_{bi} 为冷却剂在蒸发器入口处的温度，°C； T_{bo} 为冷却剂在蒸发器出口处的温度，°C； T_b 为冷却剂在蒸发器加热管中的平均温度，°C； T_s 为饱和蒸汽的温度，°C。

忽略冷却剂管道环节的热量损失，认为反应堆的出口温度 T_h 等于蒸发器的入口温度 T_{bi} ，蒸发器的出口温度 T_{bo} 等于反应堆的入口温度 T_c 。

另一方面，单位时间内蒸发器得到的热量等于蒸发器内物质温度升高吸收的热量加上蒸汽带走输出的热量，即：

$$K_b A_b (T_b - T_s) = (m_{ws} C_{ws}) \frac{dT_s}{dt} + W_s \quad (7)$$

其中： m_{ws} 为蒸发器内汽水混合物的质量，kg， C_{ws} 为蒸发器内汽水混合物的定压比热，kJ/(kg·°C)； $(m_{ws}C_{ws})$ 为蒸发器内汽水混合物的热容量，kJ/°C； W_s 为蒸发器输出功率，kW，假设 W_s 正比于蒸汽流量 F_s ，且蒸汽流量 F_s 正比于蒸汽调节阀开度 A 和饱和蒸汽压力 P_s 。饱和蒸汽压力 P_s 与饱和蒸汽温度 T_s 之间的关系为：

$$T_s = \begin{cases} 236.23 \cdot P_s^{0.1785} - 57, & 0.0725 \leq P_s < 0.359 \text{ MPa} \\ 207.93 \cdot P_s^{0.2093} - 28, & 0.359 \leq P_s < 1.676 \text{ MPa} \\ 185.08 \cdot P_s^{0.2323} - 5, & 1.676 \leq P_s < 8.511 \text{ MPa} \\ 195.18 \cdot P_s^{0.2241} - 16, & 8.511 \leq P_s < 17.69 \text{ MPa} \\ 227.3 \cdot P_s^{0.2016} - 50, & 17.69 \leq P_s < 21.5 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

式(6)、式(7)、式(8)就是蒸发器热动力学模型。

2.4. 被控对象系统结构

被控对象总体系统结构框图如图 1 所示，其中， α_T 为冷却剂温度反应性系数，pcm/°C； α_f 为燃料温度反应性系数，pcm/°C。pcm (pour cent mille)为反应性的常用单位。pcm/°C 即平均温度每变化 1°C 所引起的反应性变化量。

3. 控制器设计

尽管基于状态变量 Kalman 模型(A, B, C)的所谓“现代控制”理论很多也很“先进”(注：A、B、C为现在控制理论中最基础的状态方程中的系数矩阵)，但统计表明目前控制工程上绝大多数仍然采用“落后”的 PID 经典控制方法 [4]。因此本文暂且采用传统的 PID 控制方法来进行设计。

蒸汽负荷变化过程中，反应堆功率和冷却剂流量需要协调联动控制调节。堆功率控制调节功率产出，冷却剂流量控制调节一回路传递给二回路的功率 [5]。堆功率控制的目标参数是堆冷却剂温度，执行机构是控制棒；冷却剂流量控制的目标参数是蒸汽压力，执行机构是冷却剂泵。

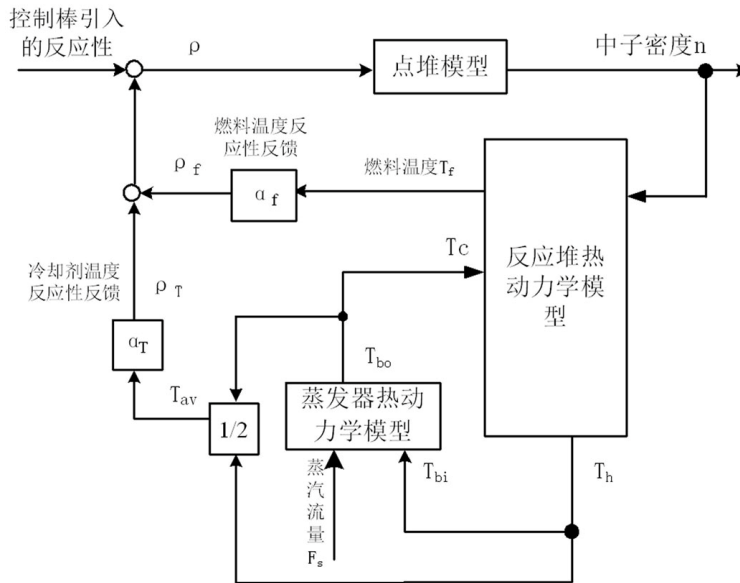


Figure 1. Controlled object system structure diagram

图 1. 被控对象系统结构框图

3.1. 反应堆功率控制器设计

反应堆功率控制器结构如 图 2 所示。其中， K_1 为温差信号放大系数； τ_1 为积分时间常数，s； Δn 为控制棒动作不灵敏区，为额定功率百分值。控制目标是维持反应堆冷却剂出口温度 T_h 基本不变，根据需要也可以将控制目标设定为维持冷却剂平均温度 T_{av} 基本不变或与蒸汽负荷成函数关系。

如果控制棒是水力机构驱动，那么移动速度通常是固定的；如果控制棒是磁阻马达驱动，那么移动速度可以连续变化 [6]。图 2 中控制棒动作是水力机构驱动，控制棒移动给反应堆引入的反应性——即微分价值根据具体对象取值，单位是 pcm/mm，为简化起见可以将微分价值设定为均匀的。

1) 温差特性：控制器中对反应堆出口温度与设定温度之差设置了不灵敏区，并进行了限幅。不灵敏区宽度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，幅度为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。温差在 1°C 以内，可以不进行功率调节；温差超过 5°C ，需求功率的变化已经足够大，为防止功率调节的超调量过大，温差幅度限制为 5°C 。不灵敏区宽度、温差幅度数值可以根据需要进行调整。

2) 温差积分信号限幅：控制器对温差信号的积分值进行限幅，幅度一般为 ± 15 ，可以根据需要进行调整。

3) 需求功率 P_0 的计算表达式为：

$$P_0 = F_s + K_1 \Delta T_h + \frac{K_1}{\tau_1} \int \Delta T_h dt \quad (9)$$

3.2. 冷却剂泵转速控制器

冷却剂泵转速控制器结构如 图 3 所示。其中， K_2 为蒸汽压差信号放大系数； τ_2 为积分时间常数，s。冷却剂泵转速控制的目的是维持蒸发器蒸汽压力 P_s 基本不变。

1) 蒸汽压差特性：对蒸发器蒸汽压力 P_s 与额定运行压力 P_{ref} 之差设置了不灵敏区，并进行了限幅。不灵敏区宽度为 $\pm a$ MPa，压差信号输出幅度限制为 $\pm b$ MPa。压差在 $\pm a$ MPa 以内时，可以不进行冷却剂泵转速调节；压差超过 $\pm c$ MPa，需求冷却剂流量的变化已经足够大，为防止冷却剂泵转速调节的超调量过大，压差信号输出幅度限制为 $\pm b$ MPa。 a 、 b 、 c 可以根据实际情况进行取值。

2) 压差积分信号限幅：对压差信号的积分值进行限幅，幅度一般设定为 $\pm 20\%$ 额定冷却剂流量，可以根据需要进行调整。

3) 反应堆功率与冷却剂需求流量之间的转换特性：为保证反应堆热工安全，可以决定冷却剂流量的下限，一般为 30% 额定流量。反应堆功率低于 30% 额定功率时，冷却剂流量保持 30% 额定流量；当反应堆功率高于 100% 额定功率时，为防止冷却剂泵超速，将冷却剂泵流量限制在 100% 额定流量。

4) 冷却剂泵转速变化特性：冷却剂泵转速变化不灵敏区设定为 5% 额定冷却剂流量。需求冷却剂流

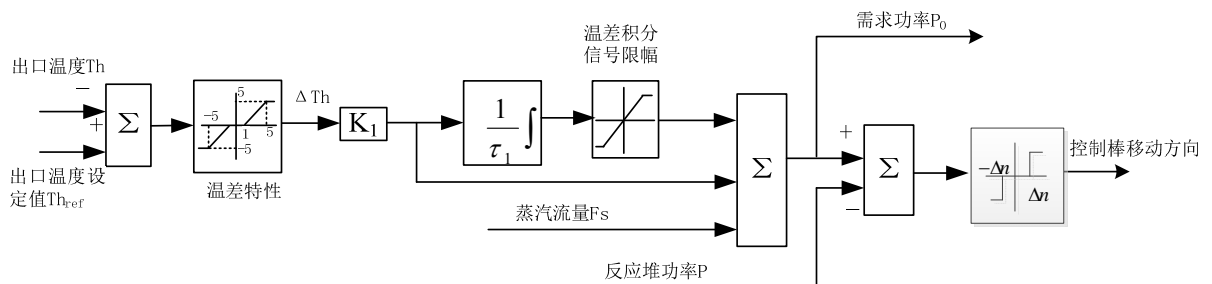


Figure 2. Reactor power controller structure

图 2. 反应堆功率控制器结构

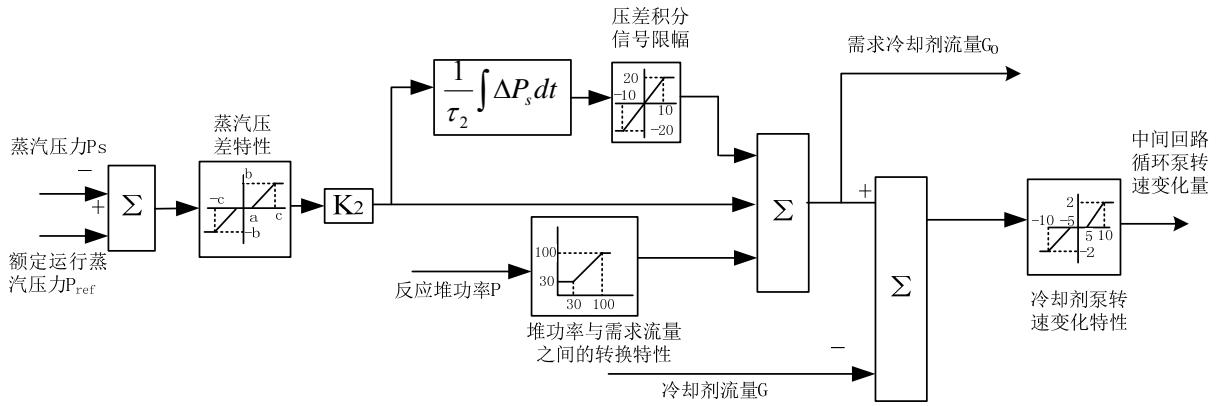


Figure 3. Coolant pump speed controller structure
图 3. 冷却剂泵转速控制器结构

量与实际流量差值在 5% 以内，冷却剂泵转速可以不进行调节；需求流量大于实际流量 5%~10%，冷却剂泵转速按 0~2 转/s² 的加速度增加；需求流量超过 10% 实际流量，则按 10% 计，冷却剂泵转动加速度为 2 转/s²。需求冷却剂流量小于实际流量的情况则相反。转速变化不灵敏区、冷却剂泵转速变化加速度可以根据实际情况进行调整。

5) 需求冷却剂流量 G_0 的计算表达式为：

$$G_0 = P' + K_2 \Delta P + \frac{K_2}{\tau_2} \int \Delta P dt \quad (10)$$

其中： ΔP 为蒸发器蒸汽压力 P_s 与额定蒸汽运行压力 P_{ref} 之差； P' 为反应堆额定功率的百分值，需求冷却剂流量为额定流量的百分值。

4. 控制器参数确定

控制器结构设计之后，就是要根据控制效果——系统参数变化幅度、超调量、调节时间，来确定控制器中的参数数值。

需要确定的控制器参数有：功率控制器中温差信号放大系数 k_1 、积分时间常数 τ_1 、控制棒动作不灵敏区 ΔN 、温差积分信号限制幅度；冷却剂泵转速控制器中蒸汽压差信号放大系数 k_2 、积分时间常数 τ_2 、压差积分信号限制幅度、蒸汽压差特性中的不灵敏区、转速变化特性中的不灵敏区、冷却剂泵转速变化加速度。

以某假想的核动力装置为例，根据被控对象与控制器数学模型，并离散化为差分方程后编制计算程序。经过调试，该程序可以正确的根据不同输入做出反馈。当在系统中投入的控制不同时，系统所彰显的动态特性亦有不同，控制效果如图 4 所示。蒸汽阀门开度阶跃变化，由 100% 瞬时变化至 50%。反应堆功率、反应堆冷却剂出口温度、入口温度、蒸发器蒸汽压力、燃料温度对初始值归一化，均用百分比表示。图 4 中，曲线 1 为被控对象固有特性，曲线 2 为仅仅投入功率自动控制，曲线 3 是功率自动控制、冷却剂流量自动控制均投入。图 4(a) 表明，投入控制后功率参数的过渡过程时间缩短为 120 s，功率重新稳定值也显著下降。图 4(b)、图 4(c) 表明，尽管冷却剂的热惯性比较大，反应堆进出口温度过渡过程时间仍缩短至 300 s 以内，重新稳定值也显著下降，投入冷却剂流量自动控制可显著降低反应堆入口温度。图 4(d) 表明，投入冷却剂流量自动控制后，二回路蒸汽压力上升幅度最小，对二回路的冲击也最小。图 4(e) 表明，投入冷却剂流量自动控制后，燃料温度也显著下降，降低了堆结构材料热应力。因此冷却剂流量随动变化控制明显优于冷却剂流量固定不变的运行方式。

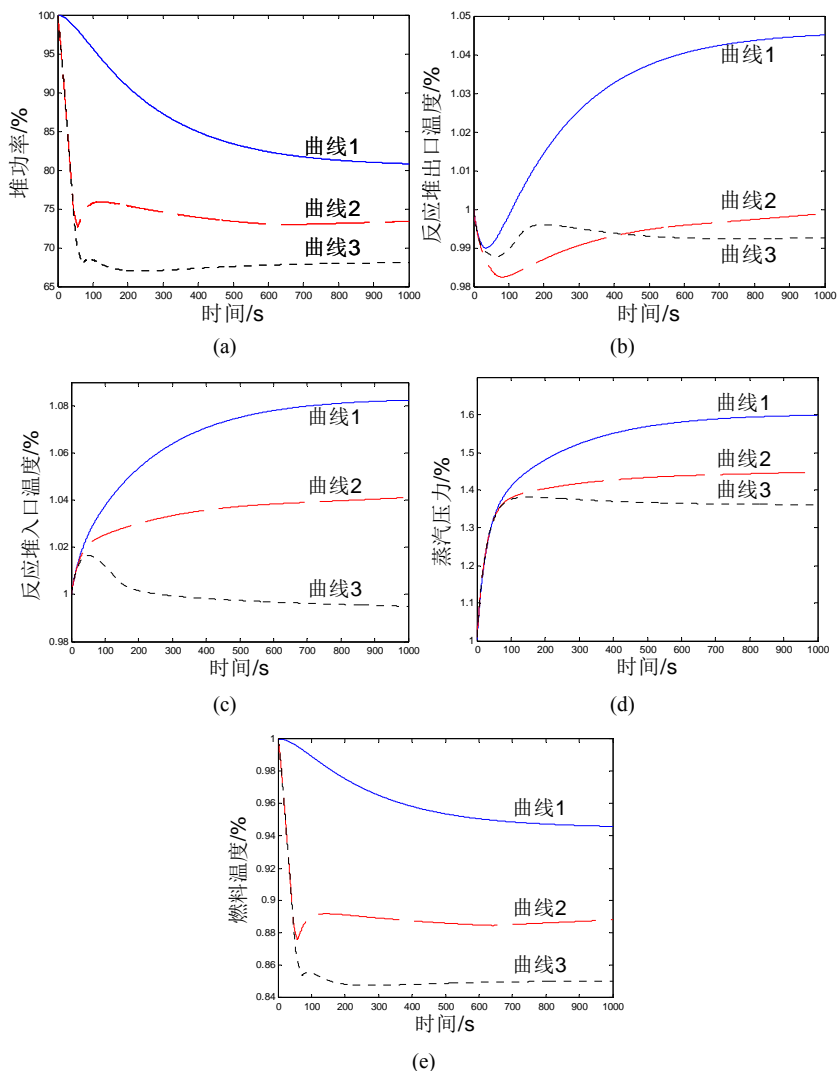


Figure 4. The numerical simulation results

图 4. 数值仿真计算结果

5. 总结

本文通过建立整个反应堆系统的集总参数常微分方程数学模型，设计了反应堆功率控制器和冷却剂泵转速控制器，并使用 MATLAB 对被控对象模型进行了仿真，确定了控制器参数。数值仿真计算结果证明：当功率控制与流量控制同时投入，冷却剂流量随动变化控制明显优于冷却剂流量固定不变的运行方式。本文建立好的被控对象数学模型，为进一步开展反应堆功率、冷却剂流量更优异的控制理论方法研究奠定了基础。但本文数学模型中未考虑反应堆冷却剂系统的压力变化，即未考虑稳压器的结构体积设计问题。

参考文献 (References)

- [1] 李凤宇, 陆古兵, 陈智 (2012) 船用反应堆冷却剂泵连续调速研究. *原子能科学技术*, 增刊, 262-266.
- [2] 杨善让 (1993) 汽轮机凝气设备及运行管理. 水利电力出版社, 北京.
- [3] 黄祖洽 (2007) 核反应堆动力学基础(第二版). 北京大学出版社, 北京.

- [4] 许国志 (2001) 系统科学与工程研究. 上海科技教育出版社, 上海.
- [5] 彭敏俊 (2005) 船用核动力装置双恒定运行方案控制策略研究. *哈尔滨工程大学学报*, **6**, 717-722.
- [6] 刘磊, 等 (2013) 模糊鲁棒控制方法在核反应堆功率控制中的应用. *原子能科学技术*, **4**, 624-629.