



华龙一号海外首堆反应堆控制系统优化设计

张 英

Optimization Design for Reactor Control System of the First Overseas HPR1000 Reactor

Zhang Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0245>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

示范快堆给水控制系统仿真研究

Simulation Research on Feed Water Control System of Demonstration Fast Reactor

核动力工程. 2020, 41(3): 158–163

核反应堆工业控制系统与企业信息系统互联安全防护体系研究

Research on Interconnection Security Protection System of Nuclear Reactor Industrial Control System and Enterprise Information System

核动力工程. 2020, 41(2): 173–177

核反应堆堆芯功率模糊切换控制系统开发及应用

Development and Application of Fuzzy Switching Control System for Nuclear Reactor Core

核动力工程. 2021, 42(2): 110–114

“华龙一号”堆芯冷却监测系统设计

Design of Core Cooling Monitoring System in HPR1000

核动力工程. 2018, 39(5): 154–158

华龙一号反应堆下腔室结构优化设计

Optimization Design of HPR1000 Reactor Lower Plenum Structure

核动力工程. 2019, 40(2): 112–116

西安脉冲反应堆半实物仿真系统设计研究

Study on Design of Semi-Physical Simulation System for Xi'an Pulsed Reactor

核动力工程. 2021, 42(2): 99–104



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0245-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0245

华龙一号海外首堆反应堆控制系统优化设计

张 英

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 反应堆控制系统是核电厂重要仪控系统之一, 对保障核电厂的正常运行起着重要作用。为确保控制系统在核电厂运行过程中的良好控制品质和减少现场调试时间, 有必要在设计阶段通过仿真研究对控制系统参数进行优化设计。分析了三代核电华龙一号 (HPR 1000) 海外首堆的反应堆控制系统功能, 对各控制系统被控变量进行了说明; 在此基础上, 对控制系统参数优化流程进行说明; 利用核电厂数字化仿真工具, 通过系统建模仿真对控制系统参数进行敏感性分析, 根据不同参数取值下的系统静态和动态响应特性得到较优的控制系统参数, 经性能验证满足设计要求。所获得的反应堆控制系统参数已用于海外华龙一号首堆反应堆控制系统设计, 并用于指导核电厂现场调试和核电厂运行。

关键词: 反应堆控制系统; 控制系统参数; 系统仿真; 参数优化

中图分类号: TL362 **文献标志码:** A

Optimization Design for Reactor Control System of the First Overseas HPR1000 Reactor

Zhang Ying

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Reactor control system is an important instrument and control system and plays a significant role in the normal operation of the nuclear power plant (NPP). In order to guarantee the good control performance of the control system during the normal operation of NPP and to decrease the on-site commissioning time, it is necessary to optimize the control parameters through simulation study on the control system in the design phase. This paper analyzes the reactor control system functions of the first overseas third-generation HPR1000 reactor, and describes the controlled variables of each control system. On this basis, the optimization of control system parameters is described. Using the NPP digital simulation tool, the sensitivity analysis of the control system parameters is carried out through system modeling and simulation, and the optimal control system parameters are obtained according to the static and dynamic response characteristics of the system under different parameter values, and such parameters meet the design requirements through performance verification. The obtained reactor control system parameters have been used in the design of the reactor control system of first overseas HPR100 reactor, and used to guide the on-site commissioning and operation of NPP.

Key words: Reactor control system, Control system parameters, System simulation, Parameters optimization

0 引 言

反应堆控制系统作为保障核电厂安全的重要仪控系统, 对保证核电厂的正常运行起着重要作

用。由于控制系统的结构和参数决定了控制系统性能的优劣, 因此为减少现场调试工作的反复, 使核电厂在运行过程中有着良好的控制品质, 往

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-06-06

作者简介: 张 英 (1974—), 女, 研究员级高级工程师, 现主要从事反应堆仪表与控制系统设计研究工作, E-mail: zhangynpic@126.com

往需要在核电厂设计阶段对控制系统所要达到的功能和性能进行研究^[1], 确定控制系统结构和被控变量。以此为基础, 通过对控制系统进行仿真研究, 验证控制系统设计及优化控制系统参数, 以确保满足控制系统性能要求^[2-3]。

本文基于华龙一号海外首堆反应堆控制系统功能和结构分析, 利用核电厂数字化仿真工具^[4], 通过系统建模对控制系统进行仿真研究, 分析控制系统参数变化对控制系统性能的影响。

1 反应堆控制系统功能与被控变量分析

1.1 整体功能和性能要求

反应堆控制系统主要包括: 反应堆冷却剂平均温度控制系统、反应堆功率控制系统、稳压器压力控制系统、稳压器水位控制系统、蒸汽发生器水位控制系统、冷凝器蒸汽排放控制系统。

反应堆控制系统的主要功能是: ①在稳态运行期间, 保持主要运行参数与设计确定的最佳值尽可能地接近; ②保证电网要求的运行灵活性, 并使核蒸汽供应系统能适应一定的运行瞬态; ③在运行瞬态或设备故障之后, 保持核电厂主要参数在正确的运行范围内, 以尽量减少反应堆保护系统不必要的动作。

在稳定工况下, 反应堆控制系统的所有控制器都工作于自动模式下, 在 15% 满功率 (FP) 至 100%FP 负荷范围内能够稳定运行, 同时不会引起向冷凝器的蒸汽排放。除反应堆冷却剂平均温度控制系统外的其他控制系统, 在 15%FP 以下也能自动控制。

在瞬态运行时, 在自动工作方式下 (即 15%FP~100%FP 范围), 核蒸汽供应系统通过反应堆控制系统的自动调节必须能够适应下述正常运行瞬态且不会引起反应堆冷却剂或二次侧安全阀或卸压阀打开 (即瞬态运行验收准则): ①以下两类瞬态不触发向冷凝器的蒸汽排放: a. 在 15%FP~100%FP 范围内, 负荷阶跃变化为 $\pm 10\%$ FP; b. 在同样范围内, 变化率为 5%FP/min 的线性增负荷或减负荷; ②以下瞬态会触发蒸汽排放到冷凝器: 从 100%FP 甩掉全部电网负荷。

1.2 被控变量分析

1.2.1 反应堆冷却剂平均温度控制系统 反应堆冷却剂平均温度是反应堆冷却剂平均温度控制系统的主要被控变量, 该被控变量的设定值由稳

态运行程序确定 (此稳态运行程序是汽轮机负荷的函数)。对于小的负荷变化瞬态, 反应堆冷却剂平均温度可单独由控制棒调节; 而对于大范围负荷变化的瞬态或低负荷工况, 则需要控制棒和冷凝器蒸汽排放同时动作以控制所需的反应堆冷却剂平均温度。

1.2.2 反应堆功率控制系统 在反应堆堆芯设计中, 采用灰棒组补偿与功率变化相联系的反应性变化。在一定燃耗下, 对应的每个功率水平都有一个棒位, 功率水平与灰棒组棒位之间的关系可由灰棒刻度曲线给出。因此, 反应堆功率控制系统可采用灰棒组棒位作为被控变量。反应堆功率控制系统设计时可考虑根据二回路功率需求控制灰棒组棒位, 使其与功率需求相对应。控制实现方案是通过控制灰棒组的移动使叠步计数器根据棒控棒位系统的提棒和插棒信号给出的灰棒组棒位, 与灰棒刻度曲线给出的对应于一定功率水平的棒位整定值一致。

1.2.3 稳压器压力控制系统 在压水堆中, 燃料与冷却剂之间的热传递发生在单相环境下, 冷却剂压力必须保持在堆芯热通道出现沸腾的压力之上, 同时不能超过反应堆冷却剂系统的设计压力。因此, 稳压器压力控制系统将测量获得的稳压器压力 (代表了反应堆冷却剂系统压力) 作为被控变量, 其控制目标是保持压力为常值。控制系统在核电厂稳态运行或正常瞬态期间, 通过控制稳压器内的电加热器或喷雾阀保持或恢复稳压器压力在其设定值附近。

1.2.4 稳压器水位控制系统 反应堆冷却剂系统在运行过程中, 由于冷却剂温度会随着负荷的变化而变化, 使得冷却剂体积发生收缩或膨胀。因此, 为尽可能保持反应堆冷却剂水装量一定, 设置了以稳压器水位 (其设定值为冷却剂平均温度的函数) 为被控变量的稳压器水位控制系统。在核电厂稳态运行或正常瞬态期间, 控制系统通过控制上充和下泄控制通道中相关执行机构的动作, 将稳压器水位建立、保持和恢复在设定值附近。

1.2.5 蒸汽发生器水位控制系统 该控制系统的作用是在稳态运行期间维持蒸汽发生器水位在程序水位定值附近; 在核电厂正常运行瞬态期间, 恢复并维持蒸汽发生器水位在可接受的定值范围

内，避免不期望的反应堆紧急停堆或异常运行状态。在核电厂运行过程中，蒸汽发生器产生的蒸汽流量和进入蒸汽发生器的给水流量共同决定了蒸汽发生器水位的高低，因此蒸汽发生器水位控制系统采用串级控制方案，主环控制回路采用水位作为被控变量，副环控制回路采用蒸汽流量和给水流量作为被控变量。

1.2.6 冷凝器蒸汽排放控制系统 该控制系统在汽轮机未并网的启堆或停堆期间吸收一回路产生的蒸汽；在快速以及大的甩负荷期间为一回路侧提供人为的蒸汽负荷，降低由于汽轮机负荷大幅度快速下降引起的核蒸汽供应系统温度与压力的变化幅度，从而避免反应堆紧急停堆。根据其实现的功能考虑高低负荷工况下的控制目标，在高负荷时采用反应堆平均温度作为被控变量，低负荷时采用蒸汽母管压力作为被控变量。

2 反应堆控制系统参数优化

在稳态运行以及最具代表性和包容性的正常运行瞬态工况下，对不同功率水平下的控制系统响应进行研究和评估。控制系统性能评估的准则为：稳定性和衰减率、被控变量的变化范围、响应速度、运行裕度。这些准则相互影响，需要在综合考虑各准则的基础上决定最终的控制系统设计结构和控制系统参数整定值。

2.1 参数优化程序

采用控制仿真程序 CATIA2 对反应堆控制系统进行瞬态分析，模拟反应堆冷却剂系统的堆芯、热段、蒸汽发生器、冷段、反应堆冷却剂泵、稳压器（包括加热元件、喷淋阀、安全阀和卸压阀等）；对于二回路，模拟蒸汽系统（包括冷凝器蒸汽排放和大气蒸汽排放）和给水系统；对各个子控制系统均进行了较详细的模拟。CATIA2 较为详细而真实地模拟了压水堆核电站一、二回路的主要系统和设备，可以实现控制通道优化和瞬态试验仿真。

2.2 参数优化流程

本节对控制系统参数优化设计流程进行介绍，流程如图 1 所示。

首先准备控制系统参数优化设计所需数据，并对反应堆系统与设备、堆芯物理、热工水力等进行模拟，以及对被控对象和系统进行模拟。对各种物理过程进行模拟时，需利用控制仿真程序

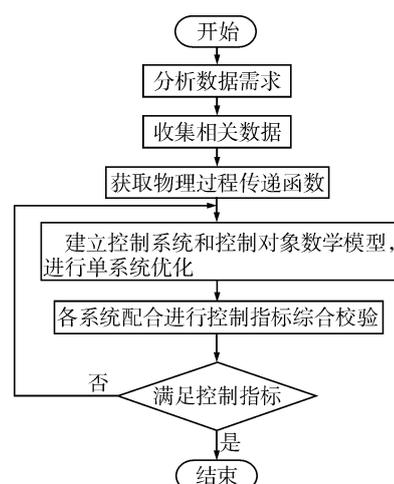


图 1 控制系统优化设计流程

Fig. 1 Control System Optimization Design Process

模拟不同过程瞬态，获取物理过程相应数据。之后在 MATLAB 程序中基于上述数据进行系统辨识，得到物理过程传递函数。然后按照一定顺序对控制系统中各控制环节进行优化设计。在优化过程中，一般采用 MATLAB 程序进行控制通道稳定性分析，实现参数的初步优化，再在仿真程序中进行控制通道动态性能和稳态性能验证，以进一步优化控制系统参数。在完成各控制系统控制环节及控制系统参数优化设计后，需对反应堆控制系统进行整体性能验证，若不满足相关技术指标，则需要重新进行控制系统中相应环节的优化设计。

2.3 参数优化实例

本文以反应堆冷却剂平均温度控制系统中功率失配通道微分时间常数 (τ) 的优化为例进行说明。

通过对控制系统参数进行敏感性分析实现失配通道微分作用的优化。逐渐加大 τ (25、50、75 s) 来调整，固定瞬态增益为 1 并且限定一个固定增益 0.2℃/%。考虑寿期初二次侧负荷变化的瞬态过程 (8%FP~15%FP~8%FP)，令慢化剂温度系数为 0，R 棒组微分价值为 10pcm/步 (1pcm=10⁻⁵)。为了使补偿通道有效，最终选定的微分时间常数只允许低振幅和低频率的极限环存在。采用不同微分时间常数得到控制棒棒位如图 2 所示。

通过对图 2 仿真结果数据进行整理，得到不同微分时间常数下控制棒棒动作周期以及每小时动作步数等信息。表 1 给出了不同微分时间常数下

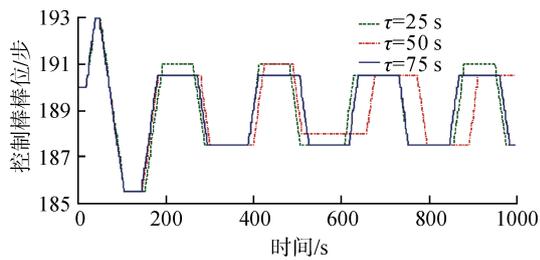


图2 不同微分时间常数下的控制棒棒位

Fig.2 Control Rod Position with Different Differential Time Constants

控制棒动作过程中需重点关注的信息,如控制棒动作周期、每小时控制棒动作的步数,以及周期内控制棒动作幅值。微分时间常数的选取需考虑控制棒动作的低幅值及低频率,即瞬态过程中控制棒动作周期长、每小时动作步数少。因此,最终选定 τ 为50 s,同时限定了控制棒运动的频率和每小时的步数。

表1 不同微分时间常数下的系统响应

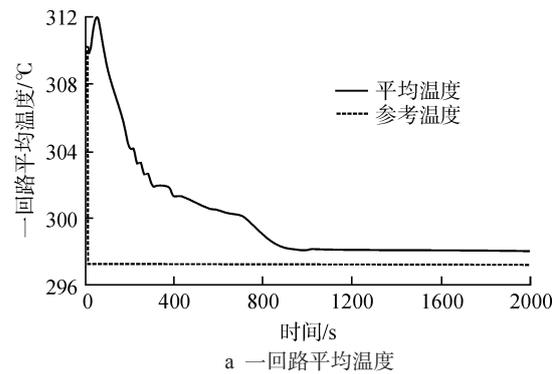
Tab.1 System Response with Different Differential Time Constants

τ/s	25	50	75
步幅值	3	3	3
周期/s	220	234	230
步数 h^{-1}	98	93	94

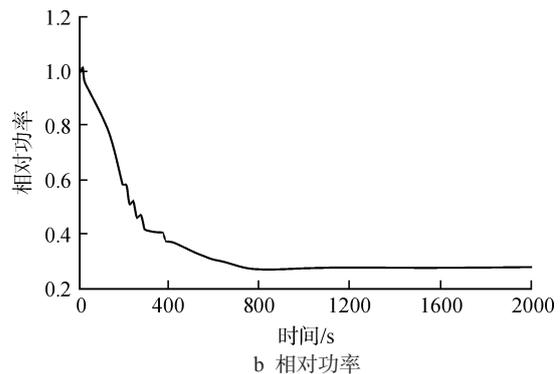
2.4 反应堆控制系统整体性能验证

对各控制系统进行优化设计后,通过瞬态仿真对系统整体性能进行综合验证。验证的瞬态工况如下:①负荷 $\pm 10\%$ FP阶跃变化(包括负荷从100%FP以 -10% FP阶跃变化到90%FP以及负荷从90%FP以 $+10\%$ FP阶跃变化到100%FP);②负荷 $\pm 5\%$ FP/min线性变化(包括负荷从100%FP以 -5% FP/min线性变化到15%FP以及负荷从15%FP以 $+5\%$ FP/min线性变化到100%FP);③负荷从100%FP到厂用负荷运行;④反应堆从100%FP到紧急停堆。上述瞬态仿真试验需满足1.1节所述瞬态运行验收准则。

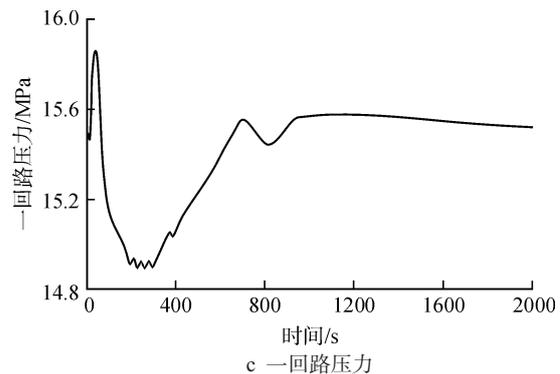
华龙一号海外首堆从100%FP到厂用负荷运行的部分仿真结果如图3所示。对图3瞬态曲线进行分析,瞬态过程中一、二回路主要参数响应过程符合设计预期,参数变化趋势与设计分析一致,且未触发安全阀或卸压阀打开;瞬态结束后各参数稳定在设计值,如图3a中稳定后的一回



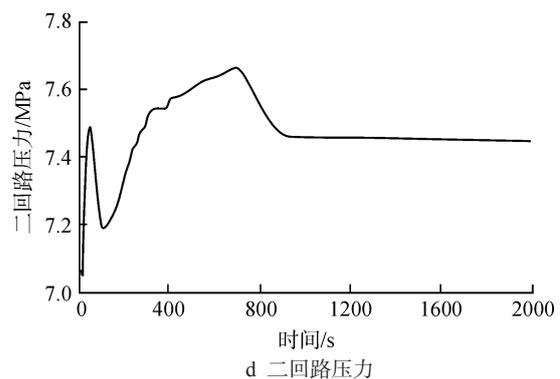
a 一回路平均温度



b 相对功率



c 一回路压力



d 二回路压力

图3 从100%FP甩负荷到厂用负荷运行

Fig.3 Load Rejection to Plant Load Operation from 100%FP

路平均温度与参考温度的差值在死区(0.83°C)内,图3b的一回路核功率信号稳定在约0.3,

图 3c 和图 3d 的一、二回路压力分别稳定在设计值 15.4 MPa 和 7.48 MPa 附近。瞬态过程中一回路核功率信号最大值为 1.02，低于其停堆阈值 1.09；一回路压力最大值为 15.87 MPa，低于停堆阈值 16.45 MPa；二回路压力最大值为 7.66 MPa，低于安全阀开启的压力整定值 8.5 MPa。该结果表明反应堆控制系统总体性能良好，正常运行瞬态满足相关验收准则，且有一定裕量，因此反应堆控制系统设计方案可行，整定值选取正确。

3 结 论

本文以华龙一号海外首堆反应堆控制系统为研究对象，完成了控制系统功能分析，确定了各控制系统被控变量；同时给出了控制系统优化流程，并利用核电厂数字化仿真工具 CATIA2 对控制系统进行了仿真研究，得到了较优的控制系统参数并进行了性能验证。结果表明，控制系统性

能满足控制要求，稳定性好，达到了控制系统参数优化设计目的。研究成果已用于海外华龙一号首堆反应堆控制系统工程实践，系统运行良好，控制系统设计优化流程可为其他核电厂控制系统优化设计提供指导。

参考文献：

- [1] 张英, 陈智. 岭澳二期核电厂运行初期R棒频繁波动问题研究[J]. 科技视界, 2015, 141(18): 342-344.
- [2] 林桦, 王云伟, 张往锁. 压水堆核电站功率控制系统对象研究及仿真分析[J]. 自动化仪表, 2017, 38(5): 7-10,14.
- [3] 冯玉昌, 史冬琳, 张秀宇. 核电站蒸汽发生器水位模糊控制系统的设计与仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2015, 42(10): 1077-1080,1098.
- [4] 张英, 陈智, 周祖鉴, 等. 用于核电厂数字化仪表控制系统优化设计的CATIA2程序的改进[J]. 核动力工程, 2008, 29(1): 19-24.

(责任编辑: 邱彦)