



核电机组瞬态过程控制性能评价诊断与优化分析

刘道光, 栾振华, 梁 军, 刘 鹏, 赵云涛, 周创彬

Evaluation, Diagnosis and Optimization Analysis of Control Performance of Nuclear Power Unit Transient Process

Liu Daoguang, Luan Zhenhua, Liang Jun, Liu Peng, Zhao Yuntao, and Zhou Chuangbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.05.0116>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

ALSTM-GPC在核电厂协调控制系统中的应用

Research of ALSTM-GPC in Coordinated Control System of Nuclear Power Plant

核动力工程. 2021, 42(S2): 41-47

CPR1000核电厂蒸汽发生器排污系统频繁隔离原因分析与优化措施

Analysis and Optimization of Frequent Isolation of Steam Generator Blowdown System in CPR1000 Nuclear Power Plant

核动力工程. 2019, 40(6): 163-167

EPR核电机组部分冷却试验研究与风险识别

Research and Risk Analysis of Partial Cooledown Test of EPR Nuclear Power Plant

核动力工程. 2020, 41(5): 122-126

核电厂仪表与控制系统设计在英国GDA过程中的若干问题分析

Analysis of Several Issues of Instrumentation and Control System of Nuclear Power Plant Design in UK GDA Process

核动力工程. 2019, 40(4): 85-90

核电厂数字化仪表控制系统商品级物项适用性确认方法研究与应用

Study and Application of Commercial Grade Dedication in Digital Instrument Control System in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(4): 76-80

北方核电厂取水口堵塞原因分析及改进措施评价

Reason Analysis and Improvement Measures Evaluation for Water Intake Blockage at Northern Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(5): 111-117



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)05-0116-08; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.05.0116

核电机组瞬态过程控制性能评价 诊断与优化分析

刘道光¹, 栾振华¹, 梁军^{1*}, 刘鹏², 赵云涛², 周创彬²

1. 浙江大学控制科学与工程学院工业控制技术国家重点实验室, 杭州, 310027; 2. 中广核工程有限公司核电安全
监控技术与装备国家重点实验室, 广东深圳, 518124

摘要: 复杂控制系统是核电厂仪控系统的重要组成部分, 其作用是保证系统运行状态的平稳, 因而对控制系统的性能验证评价是机组调试工作的重要内容。通过构建机组控制系统调试试验性能评价标准体系, 提出了一种控制系统性能评价与缺陷诊断方法, 对机组特定瞬态运行过程进行诊断和控制系统优化。该研究成果已在多个核电基地得到了现场实际应用, 在机组启动阶段全面验证了复杂控制系统的逻辑故障和性能缺陷, 提升了机组控制性能和安全运行水平。

关键词: 核电厂; 复杂控制系统; 瞬态; 性能评价; 诊断; 优化

中图分类号: TL48 **文献标志码:** A

Evaluation, Diagnosis and Optimization Analysis of Control Performance of Nuclear Power Unit Transient Process

Liu Daoguang¹, Luan Zhenhua¹, Liang Jun^{1*}, Liu Peng²,
Zhao Yuntao², Zhou Chuangbin²

1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract: The complex control system is an important component of the instrument and control system in nuclear power plants, and its function is to ensure the smooth operation of the system. Therefore, the performance verification and evaluation of the control system is an important part of unit debugging. By constructing a performance evaluation standard system for unit control system debugging and testing, a control system performance evaluation and defect diagnosis method is proposed to diagnose and optimize the specific transient operation process of the unit. This research achievement has been applied in multiple nuclear power bases, and the logic faults and performance defects of complex control systems have been fully verified in the start-up stage of the unit, which has improved the control performance and safe operation level of the unit.

Key words: Nuclear power plant, Complex control system, Transient, Performance evaluation, Diagnosis, Optimization

0 引言

核电厂控制系统作为整个核电厂的“中枢神

经”, 对核电厂安全、可靠运行至关重要。机组由于工程建设阶段的特殊性, 只能采用传统的控

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-02-05

作者简介: 刘道光(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事核电厂典型过程人机交互失效风险方面研究, E-mail: lmeiiu@163.com

*通讯作者: 梁军, E-mail: jliang@zju.edu.cn

制系统验证方法,难以解决新建或改造机组在启动前遇到的一系列难题,如控制通道性能无法动态验证、机组瞬态过程无法定量性能评价等,导致大量未经充分验证的功能设计和人因偏差进入机组的启动运行阶段,极易引发机组首次启动或改造后出现非计划停机停堆事件,严重影响机组的安全运行。在某数字化核电厂机组启动过程中,因控制系统参数不当、执行机构失效、瞬态试验过程中人工干预不当等所造成的机组运行异常意外事件多次发生,如汽轮机甩负荷至空载跳机事件、50%功率平台甩负荷至厂用电跳堆事件、负荷线性变化试验一回路过冷及汽轮机快速甩负荷事件、核岛及常规岛辅助工艺系统控制系统参数大量反复优化等问题,这些意外事件或重大试验偏差对机组状态及调试工期影响巨大。

目前,已有一些控制系统评价诊断方法用于核电厂设计的风险评价或运行技术支持。文献[1]提出基于多变量数据驱动技术的负荷控制系统性能评价方法,将过程输出数据的协方差矩阵作为评价函数,通过计算基准数据与监测数据的评价函数比值,得到控制系统性能评价的指标值。文献[2]基于与控制系统实际运行相结合的多变量数据驱动技术,提出了协调控制系统主要参数的性能评价方法。文献[3]为控制瞬态过程中一回路超压的风险,提出了瞬态过程中增设反应堆冷却剂泵停运保护信号及缓解系统改进方案,并采用 THEMIS 程序进行改进方案的验证分析。文献[4]利用瞬态分割与模糊距离进行核电厂瞬态识别,其结果可以作为性能评估诊断的工具。

当前针对机组调试启动阶段控制系统及特定机组运行瞬态试验的在线评价、控制系统缺陷诊断和优化的应用研究还处于探索阶段,缺乏相关的具体解决方法。本论文主要研究一种自动评价控制系统性能、诊断控制系统缺陷的方法,解决机组运行尤其是瞬态运行中控制性能评价、控制系统缺陷诊断和优化问题。

1 瞬态过程控制性能评价关键问题分析

机组调试阶段需完成停机不停堆、甩负荷等大瞬态试验,操作难度大、风险等级高。

某机组在执行 50% 功率平台跳机不跳堆瞬态试验过程中,触发主蒸汽流量偏差大报警,主

给水流量调节阀由自动模式强制切换至手动控制模式,导致蒸汽发生器液位升高至+0.9 m,触发反应堆跳堆。原因分析:考虑到当任一流量变送器出现异常时将导致蒸汽发生器水位调节不稳,因此仪控人员将同一环路两个变送器的选择模块设置为 5% 偏差报警,当其中一个变送器出现较大幅度波动时保持上一时刻有效值输出,并将主给水流量控制阀强制切换至手动控制模式。此设置在机组稳态运行时能够有效抑制变送器异常波动导致的控制系统扰动,但未考虑瞬态工况的情况。工作人员由于对整体控制逻辑分析的不透彻,经验不足,将参数设置错误,并且未能在试验前发现,直接导致了此次跳堆事件。

某机组在执行 50% 功率平台甩空载瞬态试验过程中,一回路功率变化剧烈,与二回路功率不匹配,叠加氙毒积累引入的负反应性,导致机组一回路过冷,从而引起轴向功率偏差进入限制运行区间,影响了机组的安全运行。原因分析:该机组在 30%、50% 功率平台瞬态试验时,采用的堆机协调函数控制曲线为 100% 功率平台理论曲线推算得来,存在一定偏差,加剧了一二回路的不平衡,极易引发因过冷导致的意外事件。

通过分析以上案例,不难发现,控制系统验证不充分、过程失误或参数设置不合理易引发安全事件,影响机组安全性和经济性。瞬态过程中对控制系统的性能评价、诊断与优化对机组的安全、稳定运行至关重要。

试验性能评价:瞬态试验对试验评价的实时性与准确性有着很高的要求,试验过程中必须全面分析判断机组的状态信息,融合多种指标实时对试验数据进行全面在线评价,从而对试验结果做出准确的评价。

控制系统缺陷诊断:瞬态试验是一个极不稳定的过程,机组各主要参数变化剧烈,对不稳定工况下的机组运行状态进行控制系统缺陷诊断,与常规的以稳态过程为主要研究对象的故障诊断有较大区别,对相关算法以及方法的研究提出了更高要求,要求数据建模更全面、准确。

控制系统优化:机组控制方式有开环控制、闭环控制、前馈控制、串级控制等,控制系统参数优化以及逻辑优化要能够识别以上各种控制过程,给出合适的控制逻辑优化方案和准确的参数

优化建议。

2 瞬态过程控制系统性能评价诊断与优化

2.1 总体技术架构

围绕控制系统验证与诊断中的制约问题，开展瞬态过程控制系统性能评价诊断与优化研究，主要包括以下 3 个方面，关键技术框架如图 1 所示。

(1) 构建试验技术评价标准及专家库：梳理核电厂设计文件中各控制系统及其瞬态自动响应的各项性能指标要求，结合实际机组蒸汽供应系统已有的试验数据及调试程序的各项验收准则，构建核电厂控制系统及基准瞬态试验评价技术标准，并形成与之相对应的专家数据库，在试验过程中实时将试验数据与验收标准进行比较，在线评价控制系统试验。

(2) 研究基于定量模型的机组特定瞬态运行控制系统缺陷诊断模块：通过对机组启动过程的 16 大典型瞬态试验（跳机、跳堆、甩负荷、负荷线性变化等）特点及机组总体运行状况进行分析，开展机组运行试验故障研究，形成瞬态试验过程主要热工参数的运行包络区间，建立基于该包络区间的预警体系，对试验过程中的偏差或趋势（可能达不到报警甚至尚未被操作员发现）实时监控及预警，并通过后续试验数据进行模型更新，实现基于定量模型的动态监测与控制系统缺陷诊断，完善相关技术性能指标，实现机组特定瞬态运行工况下的多故障、多过程、突发性快速故障诊断与预警。

(3) 研究控制系统优化：基于工业界成熟的

控制系统自整定理论和先进控制技术优化理论，构建核电厂单回路控制系统自整定模块，用于核电厂核岛及常规岛大量单回路闭环控制系统的控制参数自整定和在线优化，缩短各工艺系统在单系统及机组联调期间控制参数反复寻优的调试时间，得到各系统控制对象的动态响应特性与最佳控制参数估算值，为控制系统参数优化和性能指标评价提供直接参考。

本文研究目标是提出一种能够解决机组运行尤其是瞬态运行中控制性能评价、缺陷诊断、优化问题的方法，主要包括 3 方面内容：首先，通过实际运行数据尤其是瞬态过程的控制过程数据，依据本文提出的控制性能评价指标体系，运用控制性能智能评价方法对当前控制系统的瞬态控制效能和精度指标进行量化评价；其次，如果量化评价结果处于既定的效能和精度容许范围内，则继续保持当前的控制方式和控制参数，否则启动对当前控制方式和参数的缺陷诊断，溯源定位导致控制效果不佳的直接原因，尤其是控制参数原因；最后，诊断结果如果判定为控制参数原因，则启动控制参数优化进行控制参数的在线更新或离线更新。鉴于机组本身特点，如果判定为控制方式原因，则涉及更为复杂的控制系统再设计和再组态过程，不在本文研究范围内。因此，本文方法共包括评价、诊断、优化 3 个技术逻辑紧密相连的环节，总体技术架构如图 2 所示。

图 2 总体技术架构的实现涉及到几方面的关键技术：评价模块主要是评价指标体系的建立和量化评价模型的建立，缺陷诊断模块主要是基于多源数据融合的性能评价方法与智能优化诊断技

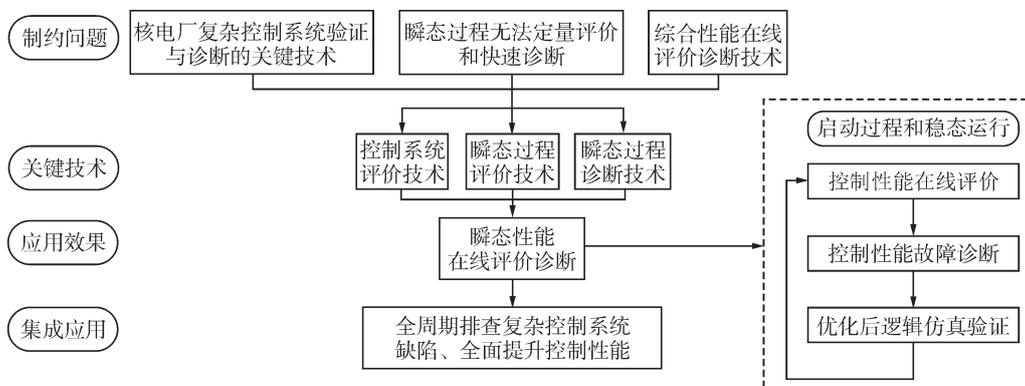


图 1 关键技术框架

Fig. 1 Framework of Key Technologies

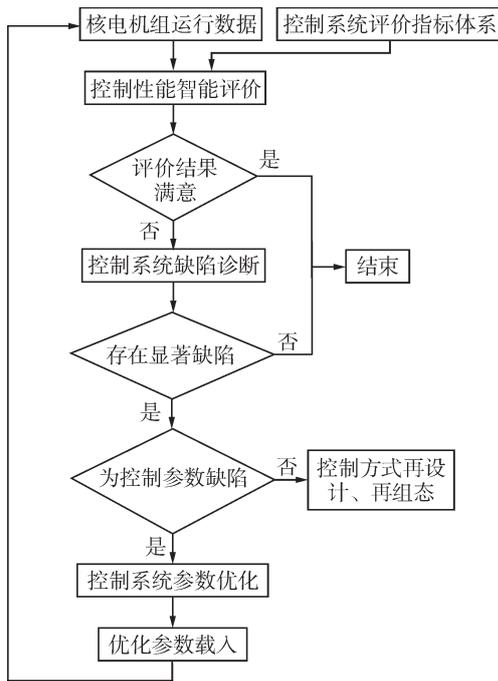


图2 总体技术架构
Fig. 2 Overall Technical Architecture

术的研究，参数优化模块主要是对控制系统参数的优化，下面将分别加以介绍。

2.2 瞬态过程控制系统评价指标体系和量化评价模型

基于瞬态过程范例库运行数据，将安全准则和运行准则与经典控制系统的评价方法相结合，建立融合机组瞬态过程安全准则、运行准则和控制准则的控制系统评价指标体系，如图3所示。

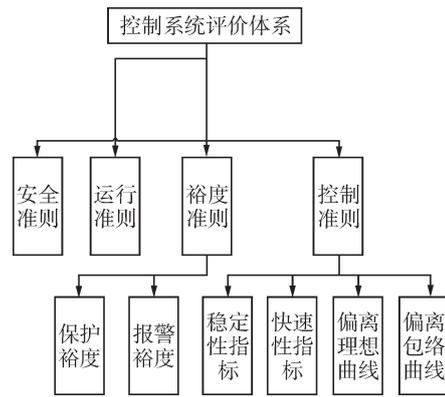


图3 瞬态过程控制系统评价指标体系
Fig. 3 Evaluation Index System for Transient Process Control System

为实现瞬态过程运行结果和过程关键参数双寻优目标，瞬态过程中利用瞬态过程数据范例库，实时将过程数据与数据库中标准曲线和包络区间进行对比，对实时数据进行偏离误差分析和运行结果动态评价，评价实时状态和运行趋势的合理性，瞬态过程后利用评价体系对瞬态过程进行全面量化评价，如图4、图5所示。

2.3 基于多源数据融合的瞬态性能评价方法与智能优化诊断技术

挖掘机组设计运行数据和多机组历史瞬态响应数据，建立具有自学习和动态更新功能的机组典型瞬态过程范例库。融合机组瞬态过程安全准则、运行准则和控制准则，构建典型瞬态过程主要热工参数安全运行动态包络区间。运用分级递阶原理建立基于多源数据融合的核电厂控制系统

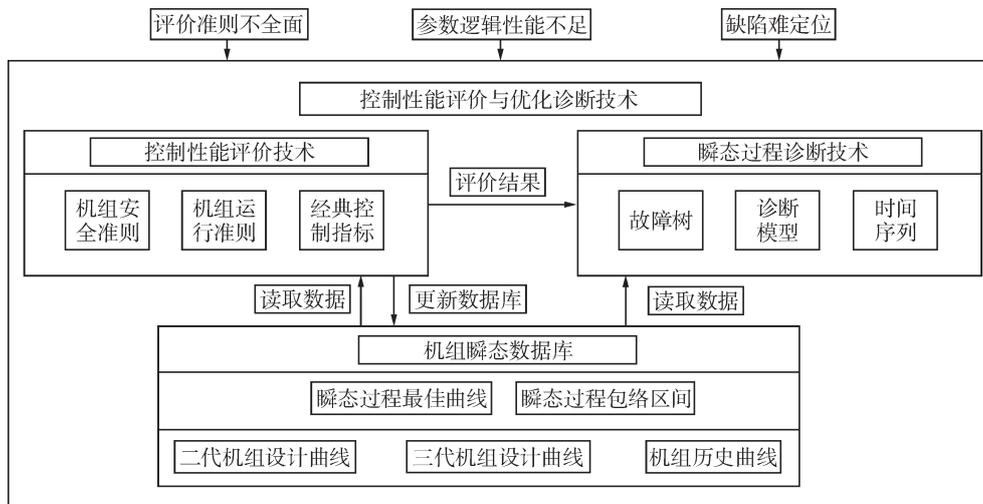


图4 控制系统评价诊断体系示意图
Fig. 4 Schematic Diagram of Evaluation and Diagnosis System for Control system

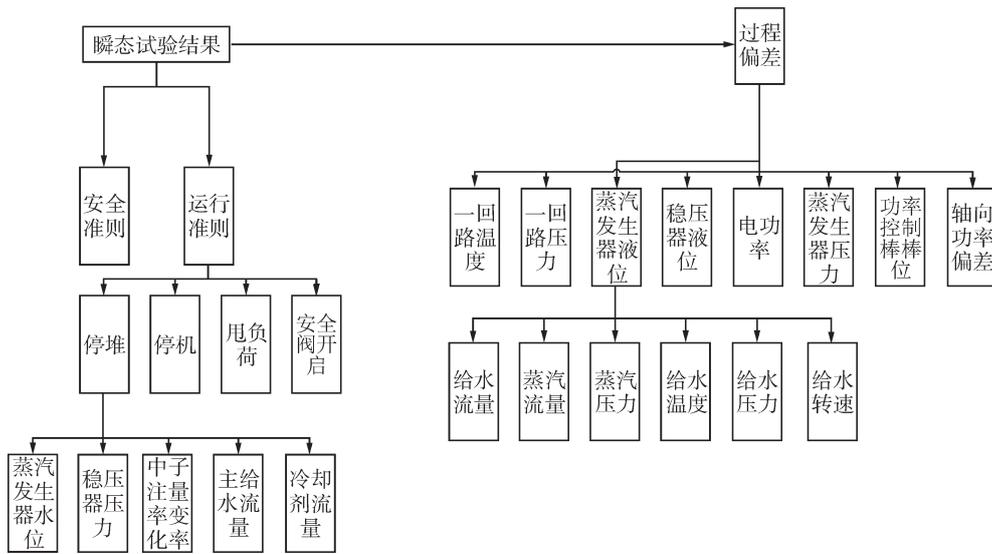


图 5 瞬态试验准则及过程偏差量化评价指标

Fig. 5 Criteria for Transient Test Results and Quantitative Evaluation of Process Deviations

瞬态性能评价方法，实现对稳态抗扰动控制和 16 个典型瞬态过程控制的瞬态结果、实时状态和趋势合理性的全面动态量化评价。

基于瞬态性能评价方法进行瞬态过程实时数据偏离范例库最佳曲线及包围区间的智能计算，进行智能优化诊断分析。结合典型运行性能劣化案例的内在机理和外在形式，建立控制系统缺陷诊断与预测征兆模型，形成基于瞬态响应信息和在线评价信息融合的控制系統运行故障定位与运行过程优化技术，解决系统耦合等原因造成的瞬

态过程故障无法快速准确定位的问题。图 6 为基于多源数据融合的瞬态性能评价方法与智能优化诊断技术示意图。

2.4 控制系统诊断优化

2.4.1 单回路控制参数诊断优化 基于继电器反馈 (RF) 整定比例-积分-微分 (PID) 控制器的主要思想为：用一个继电器环节代替 PID 控制器，通过调节继电器的滞环宽度和继电器特性幅值，使得被控对象输出振荡波形，从而在振荡波形图中获得输出波形频率和幅度，进而计算临

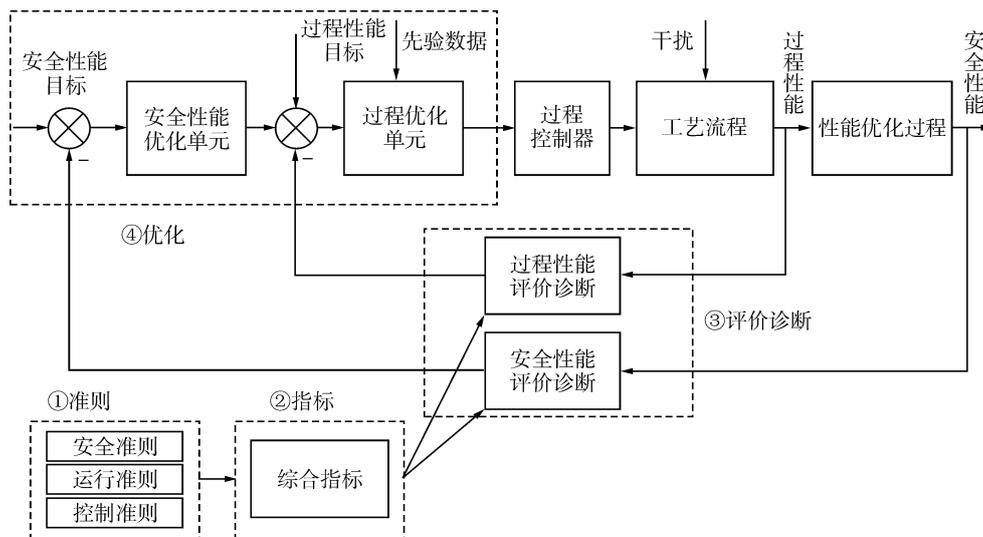


图 6 基于多源数据融合的瞬态性能在线评价与智能优化诊断技术示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of Transient Performance On-line Evaluation and Intelligent Optimization Diagnosis Technology Based on Multi-source Data Fusion

界点信息（临界增益 K_u 和临界振荡周期 T_u ），最后通过临界比例度（ZN）法获得 PID 控制器参数。基于 RF 的单回路系统控制结构如图 7 所示。该控制器有 2 个可以相互切换的模式，当需要重新整定 PID 控制器参数时，切换开关，接通继电器环节，进入整定模式。

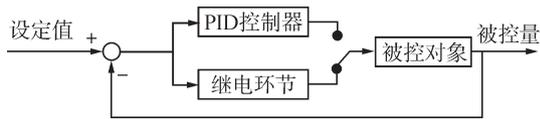


图 7 基于 RF 的单回路系统控制结构

Fig. 7 Single Loop System Control Structure Based on RF

一旦确定了振荡临界点的 K_u 和 T_u ，就可以根据如表 1 所示的整定规则来整定（优化）PID 控制器参数，并根据实际情况进行微调。

表 1 原始 ZN 整定

Tab. 1 Original ZN Setting

控制器	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$		
PI	$0.45K_u$	$0.83T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

K_p —比例调节系数； T_i —积分时间； T_d —微分时间

2.4.2 串级回路 PID 控制器参数诊断优化 串级控制回路由主回路和副回路组成。在串级系统中，由于引入了一个副回路，不仅能及早克服进入副回路的扰动，还能改善过程特性。副调节器具有“粗调”的作用，主调节器具有“细调”的作用，从而使其控制品质得到进一步提高。

实际优化中，往往把外环看作是一个定值控制系统，把内环当作一个随动系统。基于 RF 的串级系统控制结构如图 8 所示。图中有 2 个理想继电器整定环节，首先假设在 RF 下能得到稳定的极限控制环，通过稳定的极限控制环即可得到 K_u 和 T_u ，从而根据 ZN 法得到整定（优化）的主调节器和副调节器的 PID 控制器参数。外、内环

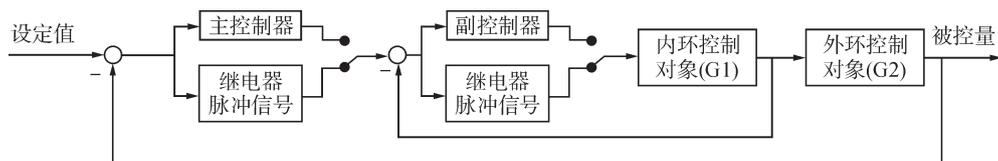


图 8 基于 RF 的串级系统控制结构

Fig. 8 Control Structure of Cascade System Based on RF

的最优 PID 控制器参数计算公式亦如表 1 所示。

3 稳压器压力及水位控制系统瞬态性能评价与诊断

3.1 稳压器压力控制系统瞬态性能评价

稳压器压力控制系统是机组的核心控制系统。稳压器压力需维持其整定值，保证正常瞬态下压力在调节范围内，不引发紧急停堆，同时避免压力失控导致稳压器安全阀动作，维护一回路边界完整。某机组试验前压力稳定在 15.4 MPa，试验中保持系统自动状态，将设定值修改为 15.9 MPa，之后由控制系统将压力调整到设定值。系统响应曲线如图 9 所示。

利用本文所给出的方法对该过程进行了评价，评价结果显示余差接近于 0，衰减比为 0，控制效果良好，具体见表 2。

3.2 稳压器水位控制系统瞬态性能评价及控制参数诊断优化

稳压器水位控制是一个大滞后的控制过程，具有调节时间长、衰减慢的缺点。如某机组稳压器水位控制系统阶跃响应超调量及稳定时间远高于合格标准，优化前曲线如图 10 所示。

当指标不符合标准时，对该控制回路的阶跃扰动曲线进行辨识，分析响应曲线，其中 G1 为所辨识流量与阀门开度的传递函数关系，G2 为所辨识得到的水位与流量之间的传递函数关系，获得 $G1 \times G2$ 的过程传递函数（见图 8），利用本文所述方法计算得到最优化控制参数后，增强比例系数，减小微分时间。获得优化的传递函数后重新执行扰动试验。扰动试验前稳压器水位稳定在 38% 设定值，将稳压器水位控制系统水位设定值给予 5% 的阶跃，即将其修改为 43% 设定值，之后由控制系统将水位自动调整至设定值。整个试验过程中，稳压器水位超调约 9%，调节时间约 700 s，优于考核指标。控制参数优化前后水位响应曲线如图 10 所示。

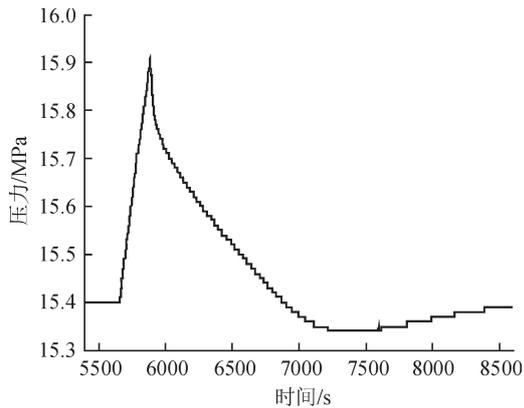


图9 稳压器压力控制系统瞬态响应图

Fig. 9 Transient Response Diagram of Pressurizer Pressure Control System

表2 稳压器压力控制系统瞬态响应评价结果

Tab. 2 Transient Response Results of Pressurizer Pressure Control System

参数	数值
峰值/MPa	15.34
峰值时间/s	1330 (相对值)
余差	0.01
调整时间/s	2272 (相对值)
超调量	12%
衰减比	0
上升时间/s	980 (相对值)
积分平方误差 (ISE)	44.2
最小方差准则控制指标	0.25

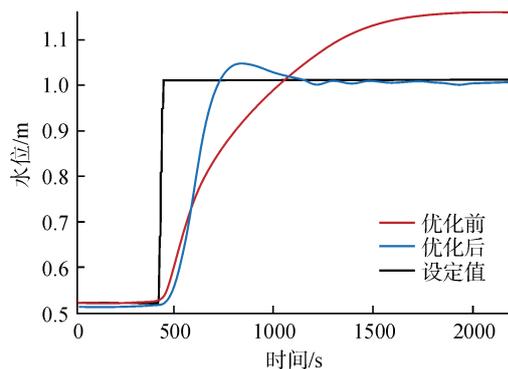


图10 水位响应曲线

Fig. 10 Level Response Curves

在100%功率平台上，参数优化前稳压器水位控制系统的超调量约为32%，调节时间大于1900 s，控制参数优化后的稳压器水位控制系统超调量约为8%，调节时间约为800 s，不存在静差。通过参数的自动诊断，超调量明显减小，而

且调节时间短、上升速度快，说明其具有很好的响应特性。另外，上升时间和峰值时间都要比控制参数优化前水位控制系统要小，且无静差，说明其稳定性能好。

评价结果表明，优化后水位控制系统快速性和稳定性均达到了较好的水平。控制系统性能不足时，基于控制系统参数整定的诊断方法可大大提高调试效率和参数精准性。

3.3 多机组对比分析瞬态工况稳压器压力控制

通过与多个机组间历史数据对比分析，可以高效快速评价各项性能指标。在机组B模拟甩负荷到厂用电试验后，发现一回路压力偏高，选择参考机组A的数据进行对比，确认了压力偏高的事实，也基本确认了变化趋势的可参考性。如图11所示，机组B在发生瞬态的瞬间压力明显高于机组A，但是瞬态发生200 s后的响应与机组A基本一致，说明控制系统抑制压力快速上升的能力明显不足，但稳态跟踪的能力基本符合要求，从而得出控制系统PID控制器中比例作用不足、积分作用基本合适的结论。

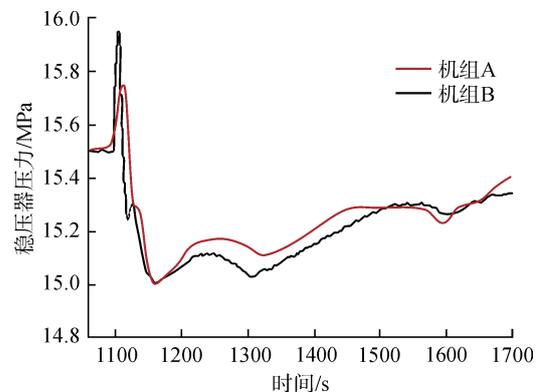


图11 多机组稳压器压力对比

Fig. 11 Comparison of Pressurizer Pressure of Multi-unit

对机组B控制系统PID控制器参数进行检查后发现，比例系数设置出现偏差^[5]，进行优化后厂用电试验结果与机组A基本一致，试验顺利完成。

4 快速甩负荷瞬态过程控制性能评价诊断与优化

机组甩厂用电、跳机不跳堆等快速甩负荷瞬态过程试验中，为快速响应补偿堆芯温度变化，温度控制棒会在短时间内快速提升至顶点，此时

堆芯开始逐渐失去温度调节能力，给堆芯安全带来很大的不稳定因素。通过对机组瞬态过程控制性能评价诊断，从而确认瞬态过程中温度控制棒提升至顶点是根本故障点，采取了与温度偏差联动增加校正因子来抑制温度控制棒快速上提的干预手段，取得了良好的效果。某机组试验结果显示，快速甩负荷瞬态过程中，过冷甩负荷裕度控制在 $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 范围内，如图12所示；轴向功率偏差甩负荷保护裕度控制在 $0.1\%\sim 5\%$ 范围内，如图13所示。试验合格率达到100%，裕度提升200%以上，极大地提升了机组运行质量安全水平。

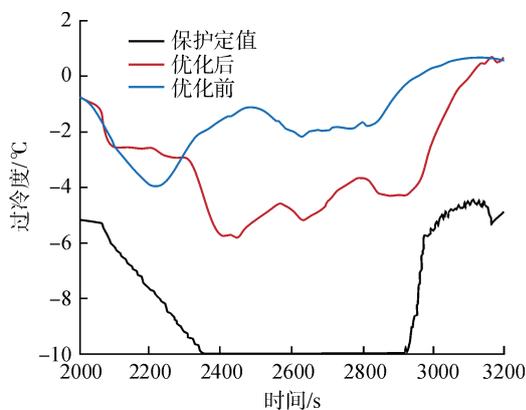


图12 过冷度对比

Fig. 12 Comparison of Supercooling Degree

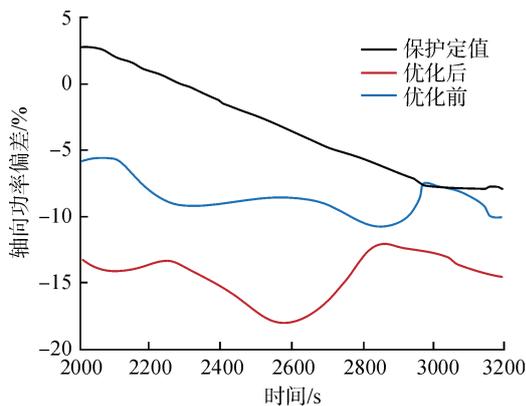


图13 轴向功率偏差对比

Fig. 13 Axial Power Deviation Comparison

5 结论

为解决控制系统首次启动或改造后启动中验证与诊断的技术问题，本文针对控制系统在线性能评价及诊断技术展开，构建了具备跨机组对比和自动更新功能的机组典型瞬态过程的运行数据库，计算瞬态过程最优曲线和运行包络区间，建立了融合机组瞬态过程安全准则、运行准则和控制准则3类指标的瞬态过程控制系统性能评价指标体系，提出了控制系统性能评价与缺陷诊断方法。

该研究成果已在多个核电基地得到了现场实际应用，在机组启动阶段全面验证了复杂控制系统的性能缺陷并开展优化，解决了控制系统首次启动或改造后启动中验证与诊断的技术问题，提升了机组控制性能和运行水平。同时，本文研究为实现核电控制系统研发、验证自主化提供了有力支持，也为我国核电站运行的安全性和经济性提供了一定的基础和保障。

参考文献：

- [1] 王印松, 李士哲, 张涛, 等. 基于协方差指标的火电机组负荷控制系统性能评价[J]. 热力发电, 2015, 44(4): 56-61.
- [2] 钱虹, 蒋高峰, 刘小鹏, 等. 基于数据驱动的机组协调控制性能评价研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 93-97, 102.
- [3] 张娟花, 林继铭. CPR1000核电厂未能紧急停堆的预期瞬态保护信号及缓解系统改进[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(10): 1811-1814.
- [4] 常远, 黄晓津, 李春文, 等. 基于模糊距离的核电厂瞬态分段识别方法[J]. 核动力工程, 2014, 35(1): 106-109.
- [5] 栾振华, 于航, 仇少帅, 等. 岭澳核电站二期TXP控制器PID参数匹配研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(S2): 81-84.

(责任编辑: 邱彦)