

CPR1000 机组 RGL 系统双夹持故障分析

姬海波¹, 荆茂林², 张恒^{3,✉}

(1. 广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538001; 2. 生态环境部华南核与辐射安全监管站, 广东 深圳 518000;
3. 重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘要: [目的] 棒位和棒控系统 RGL (Rod Position Indication and Rod Control System) 是核机组重要的控制系统之一, 其性能好坏直接关系到核机组的可用性。当该系统出现双夹持故障时会将整个控制棒组闭锁, 在机组进行瞬态试验、升降负荷或甩负荷期间控制棒组不能及时动作, 可能导致反应堆停堆。[方法] 结合某 CPR1000 核机组出现的 RGL 系统双夹持故障经验反馈案例, 从设计原理的角度对双夹持故障出现的原因进行了分析研究。[结果] 分析结果指出控制器软件中的时刻控制器误判 MG 机架状态, 从而输出错误信号导致了双夹持故障触发。[结论] 软件缺陷是造成 RGL 系统双夹持故障的重要因素。

关键词: RGL; 核机组; CPR1000; 双夹持故障; 经验反馈; 软件故障

中图分类号: TL4; TL732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0101-06

开放科学(资源服务)二维码:



Analysis of Double-Hold Fault in RGL System of CPR1000 Unit

Ji Haibo¹, Jing Maolin², Zhang Heng^{3,✉}

(1. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538001, Guangxi, China; 2. South China Regional Office of National Nuclear Safety Administration, Ministry of Ecology and Environment, Shenzhen 518000, Guangdong, China;
3. School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: [Introduction] The RGL system (Rod Position Indication and Rod Control System) is one of the important control systems in nuclear power unit, its performance is directly related to the availability of nuclear power unit when the double-hold fault happen in the RGL system, the entire control rod group will be locked, and the control rods cannot move in time during the transient test, load reducing operation or load raising operation of the unit, which may lead to the shut down of the reactor. [Method] Based on the experience feedback of the double-hold fault of the RGL system in a CPR1000 unit, this paper analyzed and researched the cause of the double-hold fault from the perspective of design principles. [Result] The analysis results indicate that the moment controller in the controller software misjudges the state of the MG rack, and thus outputs the wrong signal, which leads to the triggering of the double-hold fault. [Conclusion] Software defect is an important factor causing double hold fault of RGL system.

Key words: RGL; nuclear power unit; CPR1000; double-hold fault; experience feedback; software defect

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

棒控和棒位系统 RGL (Rod Position Indication and Rod Control System) 是核机组最重要的控制系统之一, 其性能好坏直接关系到电站的可用性。

RGL 系统在核机组启堆、功率变化和停堆过程中, 通过控制棒驱动机构 CRDM (Control Rod Drive Mechanisms) 来提升、插入和保持反应堆控制

棒, 并对每一束控制棒在堆芯的实时位置进行监视, 从而控制反应堆的反应性, 保证反应堆始终处于安全状态^[1-3]。

RGL 系统是一个很复杂的系统, 从国内外核电厂运行经验来看也出现过各种各样的故障模式^[4-6]。当该系统出现双夹持故障(double-hold fault)时会将

收稿日期: 2022-03-08 修回日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于多传感成像的 EAST 托卡马克上光学等离子体边界实时重建研究”(12005030)

整个控制棒组闭锁,且故障棒束及故障原因无法在主控室查看,需要运行人员现场对机柜进行确认。该故障发生在机组进行瞬态工况运行时,可能会导致反应堆停堆。本文结合国内某 CPR1000 核电机组的双夹持故障经验反馈,对故障原因进行了深入分析与研究。

1 RGL 系统描述

1.1 RGL 系统功能^[7-9]

1) RGL 系统通过控制棒驱动机构(CRDM)使控制棒组件在堆芯中进行提升、插入或保持等动作,实现对反应堆反应性的实时控制,并对控制棒的棒位信息进行指示和监测。

2) RGL 系统参与的自动控制功能包含反应堆堆芯功率控制功能和冷却剂平均温度控制功能。

3) RGL 系统控制和调节功率补偿棒组的棒位,使功率补偿棒组的棒位与功率需求棒位相一致,实现核电机组一回路功率与二回路功率的平衡,完成反应堆负荷跟踪模式(G 模式)的控制,实现堆跟机运行模式。

4) RGL 系统的温度棒组用于调节堆芯冷却剂的平均温度。通过使用反应堆冷却剂平均温度与参考温度之间的温度差值信号来驱动温度调节棒(R 棒)动作,控制棒的移动方向和速度由温度差值信号决定。

5) RGL 系统参与反应堆停堆操作。

1.2 RGL 系统组成^[10-12]

RGL 系统结构图如图 1 所示。

1) 棒位指示系统(RPI)接收位于反应堆压力容器的控制棒位置探测器的信号,通过译码产生每个棒束组件(RCCA)的实际测量位置。产生的位置信号通过网络数据传输送往与棒位指示系统(RPI)相关的外部系统。它也接受棒控系统(RCS)的指令,例如每个子棒束要求的位置和移动指令。通过这些指令操作,如果实际测量位置信号和设定值存在偏差,RPI 会产生报警信号。

2) 反应堆功率控制机柜 RCC(Reactor control cabinet or Reactor power control cabinet):包括反应堆温度自动控制和反应堆功率自动控制两个功能。

3) 控制棒驱动机构 CRDM:属于 RGL 系统的执行机构。每台 CRDM 装置包括提升、传递、保持线

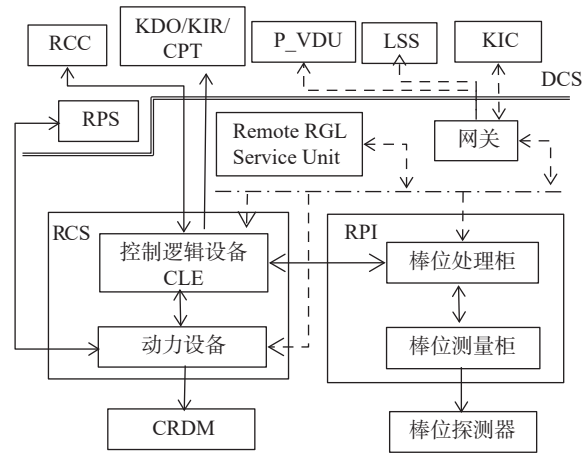


图 1 RGL 系统结构图

Fig. 1 Structure of RGL system

圈各一个,3 个线圈按一定时序通电/断电,带动两副勾爪抓入或退出驱动轴齿槽,从而带动控制棒提升或插入。

4) 棒控系统 RCS(Rod control system):接受自动提插棒及棒速信号实现反应堆温度和功率的自动调节;接受主控指令和各种联锁信号实现手动或校 1、校 2 模式控制。

2 RCS 功能结构

RCS 接收 RCC 传输来的控制棒手自动、提插指令以及反应堆紧急停堆信号(P4 信号),经过与 RPI 传输来的测量棒位进行对比而产生指令控制供电单元向 CRDM 提供相应的时序电流从而达到控制目标,双夹持故障发生在此系统。

RCS 系统主要由两部分组成^[13-15](如图 2 所示):

1) 控制逻辑设备(CLE):该设备用于根据外部动棒命令(movement order)、外部允许信号、棒位联锁和功率棒叠步程序,管理堆内子棒组的运动。控制逻辑功能分为两个主要的子功能:停堆和温度棒组控制逻辑和功率棒组控制逻辑,两个子功能均设置在控制逻辑处理单元(PLC)中。

2) 动力设备:由 16 个动力机柜组成,每个子棒组一个机柜。根据来自 CLE 机柜的动棒指令,动力设备产生合适的电流时序给 CRDM 线圈,使 RCCA 保持不动或移动。

每个动力机柜又由 3 个动力机架和 1 个逻辑控制单元(Cycler)机架组成:

3 个动力机架分别对应同一子棒组夹持线圈

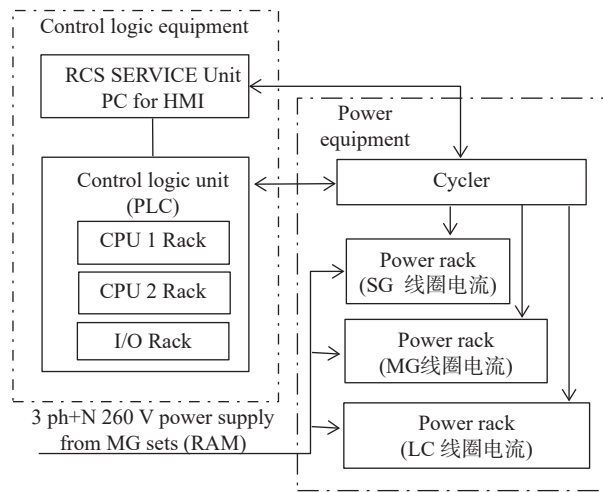


图2 RCS系统结构图

Fig. 2 Structure of RCS system

(SG)、传递线圈(MG)和提升线圈(LC)。每个动力机架产生电流给同一子棒组的4个同样的线圈,同时能够执行输出电流监视和自测试功能。动力机架任何时候都根据来自CLE的动棒指令产生相应的时序电流。每个动力机架产生的电流值由供电模块中的预制参数决定。每个供电模块控制一个线圈,并且能产生3中预制的电流值:全电流(FC)、半电流(RC)和零电流(ZC)。

Cycler 机架由一个 PLC 处理单元和相应的硬件组成。Cycler 是一个逻辑处理单元,用来产生电流定值信号给3个动力机架。Cycler 接受来自CLE机柜的每一步子棒组动棒指令,根据指令产生时序电流定值来控制动力机架并使RCCA移动一步;当动棒指令缺失时,Cycler 将产生定值,使SG线圈持续励磁保持RCCA不动。

3 控制棒双夹持原理

双夹持功能是嵌入到供电模块的,当发生故障可能导致落棒时,子棒组的所有供电模块转到安全状态:由夹持线圈SG和移动线圈MG夹住控制棒,LG线圈闭锁不带电。在这种状态下,供电模块自动控制:不再接受动力机柜产生的电流整定值序列直到报警清除。内部电流序列如图3所示:

SG线圈和MG线圈产生FC并持续300ms,之后持续产生RC,LC线圈电流为ZC。

只要SG线圈和MG线圈中有一个正常带电,控制棒就不会发生意外掉落的情形,双夹持被设计为

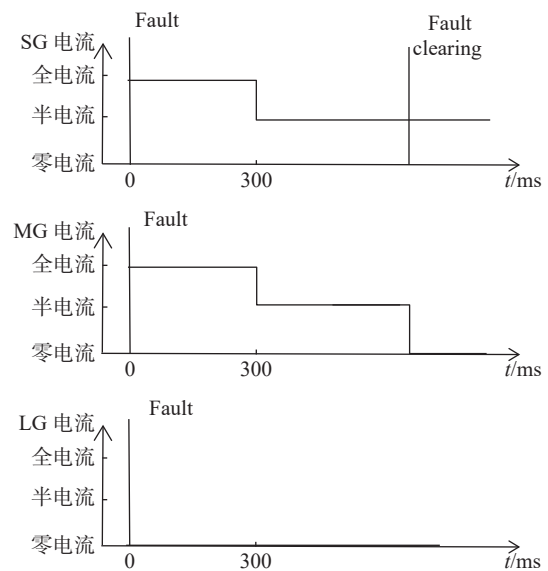


图3 双夹持电流时序

Fig. 3 Double-hold current sequence

低有效信号触发,用来防止控制棒失去电或者线路断线,触发信号如下:

- 1) 如果一个动力机架同时检测到两个以上电流整定信号会触发双夹持指令。
- 2) Cycler 处理单元故障或者 Cycler 不可用,继电器失电时,双夹持触发。
- 3) SG线圈或者MG线圈 Rack Off Chain 单一故障,双夹持触发。
- 4) SG线圈或者MG线圈整定电流信息传输到机架故障,双夹持触发。

4 运行经验反馈分析

4.1 双夹持故障触发经验反馈

2013年11月,国内某CPR1000核电机组1号机主控操作员执行R棒下插1步操作,动棒未成功,电站计算机信息及控制系统(KIC)上显示有RGL001KA(RGL故障)、RGL005KA(棒控系统运行故障)、RGL006KA(RGL运行故障)和RGL009KA(PWE机柜运行故障)。仪控人员现场检查发现RGL016AR机柜面板显示存在输出故障和运行故障,且机柜进入双夹持状态。

检查故障信号相关通道,未发现异常,重新进行功能验证,故障依然存在,怀疑控制器软件异常,执行控制器软件下装,验证R棒的提插功能后,RGL系统恢复正常。

4.2 故障原因分析:

根据现场 RGL 系统事件日志,最先触发的故障为输出故障(output fault),在输出故障触发的同时,机柜进入双夹持状态,并且输出运行故障(operation fault),此现象与输出故障逻辑相符。输出故障的逻辑如图 4 所示:

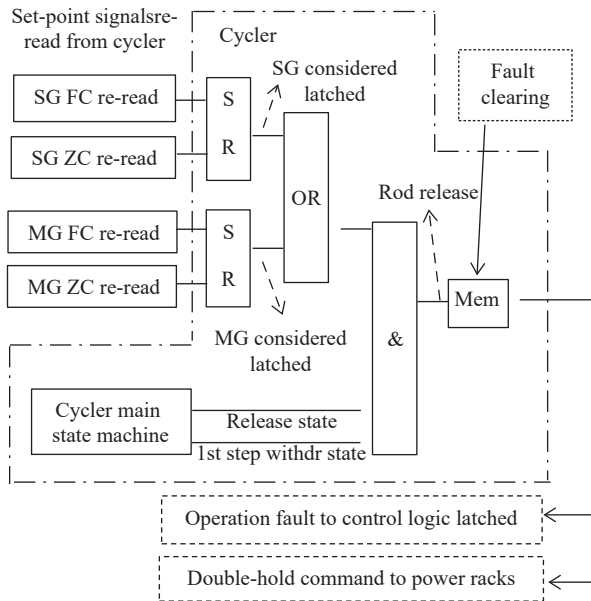


图 4 输出故障逻辑

Fig. 4 Output fault logic diagram

此逻辑的目的是确保在任意时刻(除存在落棒指令或首次提棒),SG 线圈和 MG 线圈机架至少有一个处于夹持状态,以防止落棒事件发生。由逻辑图可以看出,一旦机柜控制器逻辑检测到 SG 和 MG 机架同时处于释放状态,就会立即触发输出故障,并发送双夹持指令到动力机架。对机架夹持状态的检测是通过对控制器输出到动力机架(SG/MG)全电流指令(FC)和零电流指令(ZC)的回读(re-read)来实现的。逻辑对于 SG 或 MG 机架处于夹持与释放状态的判断准则是:当全电流回读指令出现并保持一段时间(对于 SG 机架,此时间为 79 ms;对于 MG 机架,此时间为 73 ms)后,逻辑即认为机架处于夹持状态;当零电流回读指令出现后,逻辑就立即认为机架处于释放状态。机柜出现输出故障,说明在故障时刻,逻辑判断 SG 和 MG 机架同时处于释放状态。

查看现场 RGL 系统报警视图,故障发生在控制器软件循环的 270 ms 处。而故障时刻 R 棒正在执行插棒指令,插棒指令时序如图 5 所示:

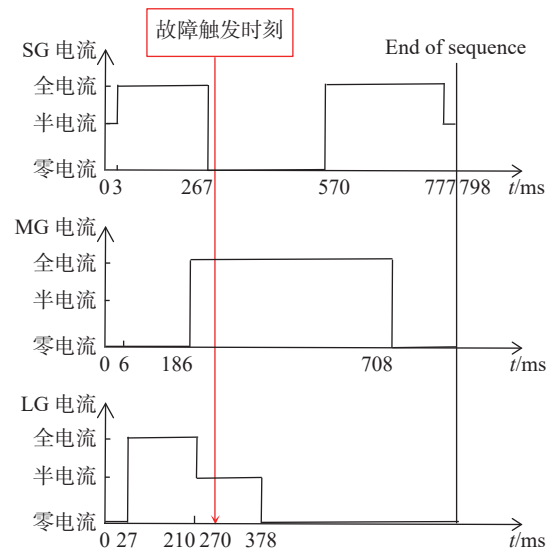


图 5 插棒指令时序

Fig. 5 Rod insertion command sequence

从图 5 可以看出,在 267 ms 处,SG 机架正好从全电流指令变成零电流指令,即逻辑中 SG 机架从夹持变成释放状态,而输出故障几乎在同一时刻(270 ms)触发,说明在 270 ms 时刻控制器认为 MG 机架仍处于释放状态,但是在正常情况下,在 259 ms(186 ms+73 ms)时刻控制器就应当认为 MG 机架处于夹持状态。所以控制器在 270 ms 未正确判断 MG 机架处于夹持状态是导致该故障发生的最直接原因。

4.3 建议措施

可以看出系统软件缺陷是造成 RGL 系统双夹持故障的重要因素,造成系统软件缺陷的原因包括:(1)设计缺陷,未能针对可能的软件缺陷问题设置相应的监测与预警手段;(2)系统参数设置,参数设置应该准确说明参数调整作用以及会出现的问题;(3)系统中存在隐藏的功能缺陷。

实际工程中需要从以下两个方面给予关注:

1) MG 机架的全电流指令回路或全电流回读信号回路接触是否不良。

2) RGL 系统动力机柜控制器软件或参数问题。

5 结论

本文简述了双夹持故障原理,并从其设计原理的角度,结合某 CPR1000 核电机组 RGL 系统双夹持故障案例的回溯,分析指出由于时刻控制器软件误判 MG 机架状态,从而输出错误信号导致了该双夹持故障触发。为防范由于系统软件缺陷对 RGL

系统造成不良影响,提出两点建议措施,并可为同类双夹持故障提供技术参考,保证 RGL 系统的安全运行。

参考文献:

- [1] 李涛,许育周,王春生,等.棒控棒位系统数字化设计[J].核科学与工程,2014,34(1):73-79. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.01.011.
L T, XU Y Z, WANG C S, et al. Digital design of rod control and position indication system [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2014, 34(1): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.01.011.
- [2] 丁俊超,李勇,浦黎.压水堆棒控系统动力熔断器烧毁原因分析及维修策略改进[J].核科学与工程,2017,37(2):189-198. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2017.02.004.
DING J C, LI Y, PU L. Cause analysis of power fuse burned in pressurized water reactor control rod system and improvement of maintenance strategy [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2017, 37(2): 189-198. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2017.02.004.
- [3] 刘冲,周剑良.核电站反应堆棒位棒控系统数字化改造设计及其可靠性预测[J].电气自动化,2010,23(2):54-56+78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2010.02.018.
LIU C, ZHOU J L. Digitization reformation and reliability prediction of rod control and rod position measure system of reactor on nuclear power plant [J]. *Electrical Automation*, 2010, 23(2): 54-56+78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2010.02.018.
- [4] 林桦,林萌,侯东,等.反应堆功率控制系统的建模及闭环验证[J].核动力工程,2009,30(4):96-99+112.
LIN H, LIN M, HOU D, et al. Modeling of reactor power control system and closed loop verification [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2009, 30(4): 96-99+112.
- [5] 孟强,王丹华.核电厂反应堆功率控制系统浅析[J].南方能源建设,2016,3(3):40-44+35. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.008.
MENG Q, WANG D H. Analysis on power control system of nuclear power plant [J]. *Southern Energy Construction*, 2016, 3(3): 40-44+35. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.008.
- [6] 昌正科,董治国,常乐莉.压水堆核电站CRDM故障诊断研究与实践[J].仪器仪表用户,2013,20(4):13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2013.04.003.
CHANG Z K, DONG Z G, CHANG L L. Study and realization of PWR CRDM fault diagnosis [J]. *Instrumentation*, 2013, 20(4): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2013.04.003.
- [7] 黄勇,刘冲.红沿河核电站3、4号机组RGL电源柜的设计与调试[J].电子技术设计与应用,2012,39(1):36-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0755.2012.01.011.
HUANG Y, LIU C. The design and debugging of RGL PWE cabinets for the units 3 & 4 in Hongyanhe Nuclear Power Plant [J]. *Electronics Design & Application*, 2012, 39(1): 36-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0755.2012.01.011.
- [8] 黄可东,张英,王华金,等.广东岭澳核电二期工程数字化棒控棒位系统设计[J].核动力工程,2008,29(2):105-109.
HUANG K D, ZHANG Y, WANG H J, et al. Design of digital rod control and position indication system of Lingao phase 2 project [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 29(2): 105-109.
- [9] 赵大威,张曙光,赵灿松,等.阳江核电站一期工程RGL系统设计研究[J].仪器仪表用户,2016,23(9):72-76. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2016.09.021.
ZHAO D W, ZHANG S G, ZHAO C S, et al. The design study of RGL system equipment in Yangjiang Nuclear Power Plant Phase I [J]. *Instrumentation*, 2016, 23(9): 72-76. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2016.09.021.
- [10] 周琦,赖厚晶,周军,等.百万千瓦级压水堆核电站棒控系统软件功能研究及实现方式分析[J].核科学与工程,2015,34(4):589-593. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2015.04.001.
ZHOU Q, LAI H J, ZHOU J, et al. A research on software function and analysis on implementation of rod control system and rod position system for 1 000 MW pressurized water reactor nuclear power plant [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2015, 34(4): 589-593. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2015.04.001.
- [11] 应永艳,张曙光.RGL系统板件工艺控制方法研究[J].仪器仪表用户,2018,25(12):5. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2018.12.002.
YING Y Y, ZHANG S G. Research on technology control method of RGL system card [J]. *Instrumentation*, 2018, 25(12): 5. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2018.12.002.
- [12] 刘燕芳,刘仕伟,汪博.控制棒棒位系统(RGL)质量控制技术研究[J].仪器仪表用户,2017,24(10):86-88. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2017.10.025.
LIU Y F, LIU S W, WANG B. Research on quality control technology of Rod Control System (RGL) [J]. *Instrumentation*, 2017, 24(10): 86-88. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2017.10.025.
- [13] 王超,杨文清,黄正东,等.某机组停堆棒意外掉落事件分析及处理研究[J].自动化仪表,2021,42(增刊1):247-252. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2021040009.
WANG C, YANG W Q, HUANG Z D, et al. Analysis and treatment of accidental drop of shutdown rod of a unit [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2021, 42(supp. 1): 247-252. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2021040009.
- [14] 周军,曾科龙,刘吉光,等.反应堆棒控系统调试方法研究—逻辑功能验证、CRDM性能试验和落棒试验[J].仪器仪表用户,2013,20(4):34-36. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2013.04.009.
ZHOU J, ZENG K L, LIU J G, et al. Study on commissioning method of control system (RGL) for reactor's full length rod-function validation, CRDM performance test and rod drop test [J]. *Instrumentation*, 2013, 20(4): 34-36. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2013.04.009.

- [15] 姚伟, 彭磊. 棒控系统电流故障典型案例分析 [J]. *自动化博览*, 2021, 38(5): 104-106. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0492.2021.05.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0492.2021.05.041).
YAO W, PENG L. Analysis for typical MDP current fault in rod control system [J]. *Automation Panorama*, 2021, 38(5): 104-106. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0492.2021.05.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0492.2021.05.041).

荆茂林

1992-, 男, 辽宁大连人, 硕士, 主要研究领域为核电厂安全监督审评(e-mail)jing.maolin@scro.mee.gov.cn。

张恒 (通信作者)

1988-, 男, 湖南常德人, 副教授, 博士, 主要研究方向为大数据人工智能、计算机视觉、计算机成像(e-mail) zhangheng@cqupt.edu.cn。

作者简介:

姬海波

姬海波 (第一作者)

1986-, 男, 彝族, 贵州盘州人, 工程师, 学士, 主要研究领域为核电厂运行培训及核安全监督工作(e-mail)jihaibo@cgnpc.com.cn。

(责任编辑 李辉)

