

核电厂 RGL 界面防人因预警系统设计分析

戴勇

大亚湾核电运行管理有限责任公司

DOI:10.12238/pe.v2i5.9870

[摘要] 本文介绍了核电厂运行人员RGL(反应堆控制棒操作系统)界面防人因预警系统设计开发过程。包括项目开发背景、项目设计理念、解决的问题以及实际应用情况,旨在增强核电厂主控室操作的安全性,最小化事故风险,有助于该核电厂的可靠和安全运行。本文提到的原则和方法可以进行再开发,以在其他数字化控制系统核设施中进行实施。

[关键词] 反应堆控制棒操作系统; 防人因; 数字化; 人机工程; 预警

中图分类号: V271.4+7 **文献标识码:** A

Design analysis of early warning system for RGL interface in nuclear power plant

Yong Dai

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD

[Abstract] This paper introduces the design and development process of RGL (Rb (reactor control rod operating system) interface for nuclear power plant operators. Including the project development background, project design concept, problems solved, and practical application situation, it aims to enhance the safety of the main control room operation of the nuclear power plant, minimize the risk of accidents, and contribute to the reliable and safe operation of the nuclear power plant. The principles and methods mentioned in this paper can be redevelopment for implementation in other digital control system nuclear facilities.

[Key words] reactor control rod operating system; human prevention; digital; ergonomics and early warning

引言

核电厂反应堆控制棒操作系统为主控室操纵员控制反应堆反应性最为直接有效的手段,因为其重要性,设计上也比较复杂。日常因为海水温度变化,导致机组功率需要进行微调,所以主控操纵员对于反应堆控制棒操作系统的操作也比较频繁,由于其操作界面初始设计存在一定的局限性,所以国内核电厂,多次出现主控室操纵员操作反应堆控制棒操作系统时,操作失误的情况,具体分析如下:

1 风险描述

2010年开始,CPR1000作为国内2代加核电技术,已在国内各核电基地广泛应用。核电厂主控操纵员控制核反应堆的方式由M310核电厂的盘台式控制进入使用电脑鼠标控制时代。其中,通过控制棒位置改变来控制反应堆反应性是一个高度自动化的过程,主要通过核电厂的控制棒自动调节系统进行。但是某些时候基于控制上的考虑,需要主控操纵员手动操作调整核反应堆内控制棒的位置,需要将控制棒系统切换到手动模式,在控件上输入正确的目标棒位,然后执行生效操作,将控制棒插入或抽出到需要的位置。

不同于以前M310机组盘台式手动操作改变控制棒位置的操

作方式,一旦操纵员输入错误的目标棒位且没有核对发现,生效后控制棒就会错误动作,产生反应性失控的运行人因事件;

DCS画面初始设计上没有考虑到该方面的人因失误风险,所以在主控操纵员频繁的操作中,存在人因失误,错误输入信息的风险。

2 系统原理

CPR1000核电厂堆芯的反应性或中子通量是通过可溶的化学毒物(硼酸)和由吸收中子物质组成的控制棒和停堆棒共同作用下控制的。反应堆控制棒操作系统是用于控制反应堆反应性的手段之一,按功能分为停堆棒组(S棒)、温度棒组(R棒)、功率棒组(G棒)。有自动、手动、失步校正1和失步校正2四种方式。其控制系统是开环控制,即实际棒位不反馈到控制系统调节,只用于与要求棒位比较和发出棒位是否相符的信号,控制棒的控制过程是程序计算的。四种方式可由操纵员在画面上进行选择,以满足不同的运行要求。

2.1 手动方式(MANUAL)

选择该方式可手动提插安全棒、温度棒和功率棒,使用该方式时,安全棒可以按SA-SB-SC-SD的顺序提棒并自动停在225步。

插棒时将按SD-SC-SB-SA的顺序并自动停在5步;

若停堆棒已被提至堆顶,温度棒可以手动提棒并自动停在C11定值上,手动插棒时将自动停在5步;

若停堆棒已被提至堆顶,功率棒可以按N2-N1-G2-G1的顺序(遵守迭步程序)提棒并自动停在225步;

插棒时将按G1-G2-N1-N2的顺序并自动停在5步。

2.2 自动方式(AUTOMATIC)

该方式用于温度控制棒和功率控制棒,以实现平均温度控制和G模式控制,停堆棒无该操作方式。

若停堆棒已被提至堆顶,温度棒可以自动提棒至C11定值,插棒时将自动停在C12定值。

功率棒由内部程序控制,并遵守迭步程序;

若停堆棒已被提至堆顶,功率棒可以按N2-N1-G2-G1的顺序提棒并自动停在225步;插棒时将按G1-G2-N1-N2的顺序并自动停在5步。

2.3 校正方式-1(Realign-1)

该方式通过主控开关的切换选择任意一棒组,用于控制棒的失步校正及满足实验的要求。使用该方式时:

控制棒棒位计数器不变化,提插棒的步数由一专用计数器计数:

提插棒时,同一棒组的两个子棒组同时移动;

温度棒和功率棒在5步和225步之间可自由提插,功率棒不遵守叠步程序。

2.4 校正方式-2(Realign-2)

该方式通过主控开关的切换可选择任一棒组,用于控制棒失步的校正及满足实验的要求;

使用该方式时,控制棒棒位计数器变化;

提插棒时,同一棒组的两个子棒组按正常程序(两个子棒组之间差半步)移动;

功率棒遵守叠步程序。

因此,在实际机组控制过程中,以操纵员手动改变控制棒位置为例,采用的是由操纵员首先在系统控制模式选择控件上,将要操作的控制棒置于手动(或者校正1、校正2位置);其次再使用棒位目标值设定控件通过鼠标点选或键盘输入的方式,手动输入棒位目标值并确认执行;最后通过生效控件确认执行操作的控制方式。最后一步生效操作确认后,控制棒即会朝着目标棒位按着系统设计棒速持续移动。这种控制棒的手动操作方式,虽然设计上也采用的是双重确认最后生效操作的方法,但是当操纵员特别忙碌,注意力不够集中,或者知识点缺失时,错误输入了目标棒位并确认,将引起控制棒的错误移动。此时需要操纵员自行识别并立即点开生效控件取消生效,控制棒才能停止移动。尤其当错误目标棒位远大于当前棒位时,这种人因失误将导致反应性的失控增加,影响反应堆的安全。

国内DCS数字化核电机组,已发生多起操纵员由于数值输入错误造成控制棒失控移动的事件。在核电厂模拟机培训过程中,新学员也经常发生类似失误,培训中仍是靠行为规范的严格执

行来避免。应该如何通过对核电厂人机操作界面的进一步优化,降低其人因失误概率,实现有效提升安全性。下面将结合核电厂人机交互画面设计要点,综合分析国内核电业界近年来的RGL系统操作失误案例,对核电厂运行人员RGL系统操作防人因预警设计的详细过程和应用情况进行介绍^[1]。

3 研发过程分析

核电厂画面设计需要特殊的考虑和规范,以确保操作员能够有效地监控核电站的运行。

1979年三里岛核电站事故引发了对核电站人机界面设计的广泛关注。其部分原因是由于界面设计不清晰,操作员难以理解和应对故障情况。该事件强调了信息可视化、警报系统和培训的关键性。2011年福岛核事故后,日本核电站界面设计也进行了审查和改进。改进后日本核电站界面设计更强调了对紧急情况的响应和核电站设备的状态监控。美国核能监管委员会(NRC)也发布了一系列关于核电站人机界面设计的指南和审核标准,以确保核电站满足安全和可用性要求。这些指南为最佳实践提供了框架,帮助核电站界面设计符合最高标准^[2]。

总结后人机界面设计的要点包括几个方面:(1)用户中心设计。包括用户需求分析、用户画像、用户测试几个方面。定期进行用户测试和反馈,以改善界面的可用性。(2)可用性。包括易学性、效率、易记性、错误预防和容忍几个方面,减少用户犯错的机会,同时提供容忍性,使他们能够纠正错误。(3)信息架构。包括组织信息、导航、标签和分类、可视化设计、色彩和排版、图标和图形、一致性几个方面,以减少用户的混淆和迷失感。(4)交互设计。包括反馈、响应时间、键盘与鼠标交互几个方面,以满足不同用户的需求。(5)通用设计。包括考虑无障碍、多语言支持两方面,以扩大用户群体。(6)可伸缩性。包括适应不同屏幕尺寸、响应式设计、安全性和隐私保护、用户培训几个方面。这些要点是人机界面设计的关键方面,工程师需要综合考虑它们,以创建用户满意且易于使用的界面^[3]。

3.1 研究方法及其可行性论证

该核电厂控制系统为西门子的系统,如果说现场设备是底层的话,其中间的软件控制层是1层,操纵员操作的画面就是2层。西门子提供了可以对2层人机交互界面进行编辑的配套软件OM EDIT,能够对人机界面进行图形化编程;同时也提供了ES FUP软件,能够对1层进行图形化编程。OM EDIT软件的优点是只对操作画面本身进行编辑,能从系统进行取值,实现简单的运算,且能够快速下载到机组实现应用,不影响核电厂深层次的控制;缺点是不能通过编程实现复杂的逻辑运算。ES FUP软件优点是可实现复杂的逻辑运算,缺点是需要走工程改造流程,上线也需要经过大修进行系统升级,无法实现快捷应用。

通过对比两套软件功能,以及前文所分析的画面优化方向,OM EDIT软件完全满足优化要求,可以展开画面优化实践。具体从两个角度出发:

3.1.1 控制棒移动方向预警

在操纵员完成目标值的输入后,通过目标值与当前实际值

的偏差显示方向箭头,目标值大于设定值时,即通过红色向上箭头,提示操纵员控制棒将上提;通过绿色向下箭头,提示操纵员控制棒将下插;

3.1.2 控制棒移动幅度预警

通过目标值与当前实际值的偏差,大于特定值之后,即判定控制棒即将朝箭头方向进行大幅度移动,此时在控制棒棒位指示处以大红框底色的形式发出预警,提示操纵员,若执行操作,将发生大的棒位位置改变。

3.1.3 以上设计方案同样可以应用到校正因子的操作设置预警

3.2 具体编程方案论述

OM EDIT软件中总体设计编辑逻辑介绍如下:

当完成目标棒位输入时,画面逻辑触发时,画面的目标棒位值旁边,同步产生向上提升的红色箭头提示、或向下移动的绿色向下箭头、当目标棒位大于当前棒位某一固定值时,显示大红色警示框,提示若执行生效按钮,控制棒将会朝着箭头方向做大幅度移动。

3.3 具体编辑逻辑内容

(1)画面上自动控件生效,则不会产生报警提示;控件手动时,则按逻辑发出提示;(2)手动状态下,设置值生效后与棒实际值比较。逻辑触发后,设置值大于实际值时,产生向上红色箭头,大于某一较大固定值时,产生红色警示框。设置值小于实际值时,产生向下绿色箭头,小于某一较大固定值时,产生红色警示框。(3)校正方式-1位置控件生效(绿色),相对棒位(+值输入),设置值生效后与实际值比较,逻辑触发后,设置值大于实际值时,产生向上红色箭头,大于某一较大固定值时,产生红色警示框。设置值小于实际值时,产生向下绿色箭头,小于某一较大固定值时,产生红色警示框。(4)校正方式-2位置控件生效(绿色),绝对棒位(5-235步值输入),设置值生效后与棒实际值比较。逻辑触发后,校正方式-2环节的设置值大于实际值时,产生向上红色箭头,大于某一较大固定值时,产生红色警示框。设置值小于实际值时,产生向下绿色箭头,小于某一较大固定值时,产生红色警示框。

3.4 具体校正因子逻辑编辑内容:

校正因子设置环节,设置值生效后与实际值进行比较触发警示逻辑。设置值大于实际值时,产生向上红色箭头,大于某一较大固定值时,产生红色警示框。设置值小于实际值时,产生向下绿色箭头,小于某一较大固定值时,产生红色警示框。

4 研究结论与分析

该项目从DCS核电厂操作员对控制棒进行手动操作的过程展开分析,开发出了一种画面预警显示方法,在操纵员进行手动操作控制棒的最终确认阶段前,引入了系统判断与预警,从操纵员认知层面进行了提升,减轻操纵员在操作过程中的认知负荷,减少操纵员记忆提取的时长,避免认知启动效应带来的影响,增加了操纵员认知判断的准确性,从而降低操纵员操作失误的概率。

该预警项目开发后,在该核电厂机组上进行实际应用。截至目前为止,该核电厂机组未再发生由于控制棒位置输入相关操作失误导致的人因事件。由此,该核电厂RGL界面防人因预警系统设计,可以有效降低主控操纵员的失误概率。从行为规范的角度,模拟机培训中进一步要求主控室操纵员在完成目标棒位设置之后,养成观察画面预警是否符合预期的习惯,将更进一步的保证操纵员执行操作的准确性。

该项目通过目标值与实际值的实时比对,同时通过高亮底色醒目提醒、辅助以向上红色柱状箭头、向下绿色柱状箭头等多重方式进行逻辑比对及提醒,有效的提醒主控操纵员,在防人因方面起到了实效。

5 检查项目及进展

目前该项目已经在实际机组上得到应用并取得一定的效果。

6 后续行动

(1)跟踪项目后续执行情况;(2)进一步根据核电厂人机界面的应用情况,挖掘人因陷阱,深度进行开发。

7 结论

综上分析,该核电厂运行人员RGL界面防人因预警系统设计,可以有效降低主控室操纵员的操作失误概率。

[参考文献]

- [1]李鹏程,张力,戴立操,等.核电厂数字化人-机界面特征对人因失误的影响研究[J].核动力工程,2011,32(01):48-52.
- [2]谷鹏飞,倪莹,陈卫华,等.基于人机界面发展的核电站控制室设计[J].原子能科学技术,2015,49(S1):391-395.
- [3]崔瑶,董旭辰.核电厂人机界面的人因设计验证方法研究[J].电脑知识与技术,2018,14(14):44-47.

作者简介:

戴勇(1982-),男,汉族,湖南省涟源市人,大学本科,工程师,从事核电运行技术研究。