

CNIC-01302

IAE-0189

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

游泳池反应堆控制保护系统安全整治

THE SAFETY RENOVATION OF THE CONTROL AND
PROTECTION SYSTEM FOR 49-2 (SPR)

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01302 IAE-0189: 游泳池反应堆控制保护系统安全整治: /孙学良等著. —北京: 原子能出版社, 1999. 1

ISBN 7-5022-1964-1

I. 中… II. 孙… III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 36625 号

游泳池反应堆控制保护系统安全整治

孙学良等著

©原子能出版社, 1999

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 19.0 千字

1999 年 1 月北京第一版 · 1999 年 1 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元



孙学良：中国原子能科学研究院高级工程师，1968年毕业于西安交通大学无线电技术专业。

Sun Xueliang: Senior engineer of China Institute of Atomic Energy. Graduated from Xian Jiaotong University in 1968 majoring in radiotechnics.

CNIC-01302

IAE-0189

游泳池反应堆控制保护系统安全整治

孙学良 吴洮生 陈克之 郑文耀 郝怀德

(中国原子能科学研究院, 北京)

摘 要

“游泳池反应堆控制保护系统安全整治工程”应用现代测控技术, 严格遵照核安全法规标准进行设计、制造、安装、调试, 建成了一个先进的试验堆控制保护系统。新系统增设和完善了保护变量与保护设备; 监测装量的灵敏度提高了 1~2 个量级; 停堆状况下有 5 个独立的监测装置同时指示堆功率, 稳定性与抗干扰性能好。全新的自动功率调节系统不仅品质优良, 且自动工作的量程下限由千瓦级扩展到十瓦量级, 提高了运行安全与灵活性; 增设 UPS 不间断电源作系统安全电源, 保证可靠停堆与在反应堆失去全部电源情况下指示堆功率。二年多良好的运行工况证明了整治的成功。该项目是我国试验研究堆控制保护系统全面整治的首例, 其成功对其他堆整治与新堆的设计运行有重要的参考价值。

THE SAFETY RENOVATION OF THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEM FOR 49-2 (SPR)

(In Chinese)

SUN Xueliang WU Taosheng CHEN Kezhi

ZHENG Wenyao HAO Huaide

(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

The introduction of the safety renovation project of the control and protection system of the swimming-pool research reactor (SPR) is presented. An advanced control and protection system for 49-2 (SPR) has been designed, manufactured, installed and tested. In the design of the new system, the modern measuring and control techniques are employed and the national standards and nuclear safety codes are strictly followed. Protection variables and equipment are modified; Sensitivity increased about 1~2 orders of magnitude; at shutdown condition, 5 independent monitors indicate reactor power at the same time; It has good stability and anti-jamming ability. New type of auto-power adjusting system is of good quality; and the Minimum reactor power for patting into auto-mode is modified to be 10 W level instead of previous kW level. Thus the operation safety is ensured and sensitivity increased; added UPS as backup power supply ensures safe shutdown and the indication of the reactor power at reactor shutdown. This project is the first attempt of the renovation of the control and protection systems of the research reactors in China. The success of the two years safe operation of the new system would be of value for the reconstruction of other research reactors and for the design of the new Research Reactors.

概 述

游泳池反应堆是我国自行设计建造的第一座试验研究堆。建造于 60 年代初,运行已 30 多年,其设备已不能适应现代化技术的要求,存在着一些安全隐患,如:不能满足现行核安全法规与标准的要求,无周期保护,启动测量冗余不够,电缆老化,设备陈旧、可靠性差等。随着我国核工业技术的发展,核工业法规及标准体系也得以建立与逐步完善;国家对核安全要求不断强化,对核设施的设计、建造、运行与管理等提出了新的要求。国家核安全局要求必须对该反应堆进行安全整治。

70~80 年代,世界上核技术先进的国家已经着手进行试验研究堆的更新改造。现在我国核工业的发展已有足够的技术和设备力量进行现代研究堆的设计建造。因此,对该反应堆进行安全整治已具有良好的技术、物质条件。

如前所述,针对该反应堆所存在的问题,安全整治的重点确定为控制保护系统。而对控制保护系统安全整治的依据是我国现行的核安全法规及标准即系统的设计、制作、安装、调试必须严格执行核安全法规标准的要求应用新技术,更新和完善安全设备和其他控制系统,使系统具有良好的安全性与可靠性。

整治工作可分为准备与停堆整治二个阶段。准备阶段主要完成方案论证与设计、设备制作、定货,现场改造设计、抗震设计、安全审评,自动调节系统的设计、系统模拟调试等。停堆整治阶段主要完成:拆除旧系统设备、现场改造、抗震校核、敷线设计、敷线与电离室电缆更换、设备机柜就位、仪器检查调试、系统安装、接线、测试、分系统试验、综合调试及试运行等。

整治工作中建立了相应的整治质保程序,将整治工作纳入相应的质保体系。安全整治工作还始终得到国家核安全局和上级主管部门的支持帮助。工程进行顺利,按时完成了各项整治工作,一次通过各主管部门与国家核安全局的验收。于 1996 年 5 月正式投入运行,至今,控制保护系统的运行安全可靠。

1 整治的原则与依据

整治所遵循的原则:执行核安全法规、标准,确保安全可靠;“必须”与“可能”相结合,在资金与条件可能的情况下,尽可能地应用先进技术与设备。

我国已经颁布的核安全法规标准是进行安全整治的基本依据,主要有:

- | | |
|--------------|--------------------|
| a. HAF100-1 | 《试验堆设计安全规定》 |
| b. GB4083-83 | 《核反应堆保护系统安全准则》 |
| c. EJ603-91 | 《试验堆安全系统准则》 |
| d. GB4860-84 | 《核反应堆仪器仪表一般特性》 |
| e. GB5204-85 | 《核反应堆保护系统的定期试验与监测》 |

2 整治方案简介

2.1 控制系统变更范围

为了达到安全整治的目的,权衡诸方面的因素,确定了控制保护系统整治的变更范围为:除老系统的机械传动装置与棒、电离室保持不变外,原控制保护系统的其它部分全部拆

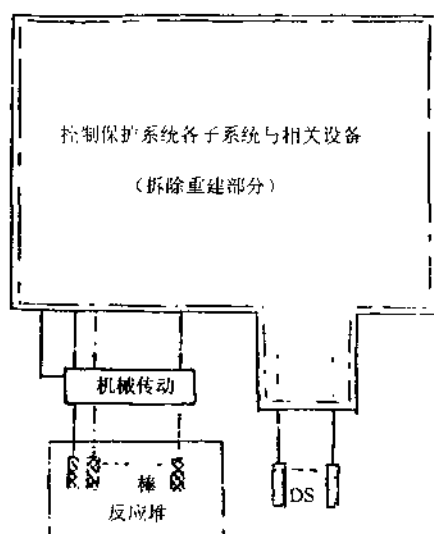


图1 控制保护系统整治范围说明图

除重建（含屏、台等）见图1。

2.2 新控制保护系统的构成方案

2.2.1 保护系统（见图2）

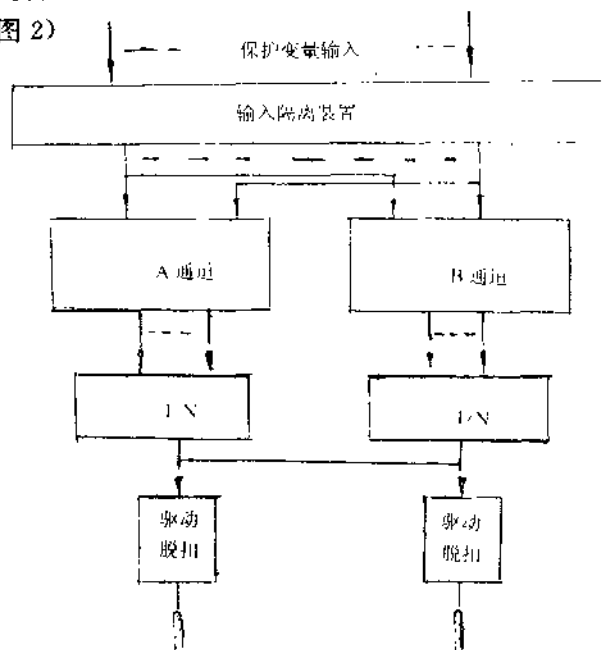


图2 保护系统框图

- (1) 新设三套周期保护监测装置（2/3 符合保护）；
- (2) 新增游泳池水位低保护监测装置；
- (3) 功率保护装置增为三套（2/3）；
- (4) 增设紧急停堆按钮装置；

- (5) 设保护系统投入接近管理控制；
- (6) 变保护通道为互冗余的双通道 (1/2)；
- (7) 保护通道互为独立且与其它系统隔离；
- (8) 设保护通道自动与手动故障检查装置。

2.2.2 监测装置

(1) 功率测量装置

设启动功率测量一套 (10^{-11} A $\sim$ 3×10^{-4} A 范围)，设自换量程与量程位显示。

功率测量一套 (带数字功率表指示) (10^{-10} A $\sim$ 3×10^{-4} A)，自换量程与量程位显示。

(2) 周期监测装置三套：以 2/3 符合提供保护，设故障自检。

带对数电流表指示，范围： 10^{-11} A $\sim$ 3×10^{-4} A。

(3) 功率保护监测装置三套：2/3 提供保护，设量程位置显示与故障自检。

指示范围： 10^{-9} A $\sim$ 3×10^{-4} A。

(4) 自动功率调节测量二套：互为独立的备用系统，设量程位置显示。

电流测试指示： 1×10^{-10} A $\sim$ 3×10^{-4} A。

2.2.3 信号系统

(1) 信号系统仍设灯光、铃、笛三种显示；

(2) 信号等级设警告、事故；

设事故 (变量) 信号 8 个：功率定值 $\geq 120\%$ ；周期 $T \leq 10$ s；一次水泵停；一次水流量低；游泳池水位低；两台保护仪器故障；二台周期仪器故障；试验回路事故。

警告信号设 64 个 (略)。

(3) 信号系统与安全系统实行隔离。

2.2.4 供电系统

(1) 供电系统除设交流 I、II 段与可靠电源外，增设 UPS 不间断电源系统。

(2) UPS 电源系统由五台 1000 W 在线式不间断电源组成。其目的在厂房内外电源全部丧失时，提供控制系统电源，使全部棒下降到底，并向功率表供电指示堆功率。

2.2.5 功率自动调节系统

(1) 仍设二套互为备用的功率自动调节系统；

(2) 系统环节全部更新：将交磁机伺服放大环节更新为振荡线性化环节的脉冲调宽放大器，定值器与放大器采用高性能的运算放大器，展宽系统定值功率范围二个量级，以利运行。

2.2.6 更换全部电离室的电缆

2.2.7 设抗震机柜 12 个，装置全部控制系统的仪器与设备，重新设计制作控制台与控制屏 (以利独立、隔离、抗震、防火等)。

2.3 系统结构布置 (见图 3)

2.3.1 中央控制室

(1) 设保护机柜三个，调节柜一个及控制操纵台。

(2) 控制屏上装置事故与警告信号牌 (灯、铃、笛)，数字功率表与活性区模拟盘。

(3) 启动用控制仪表及操纵开关，按人因工程设置于操纵台上。

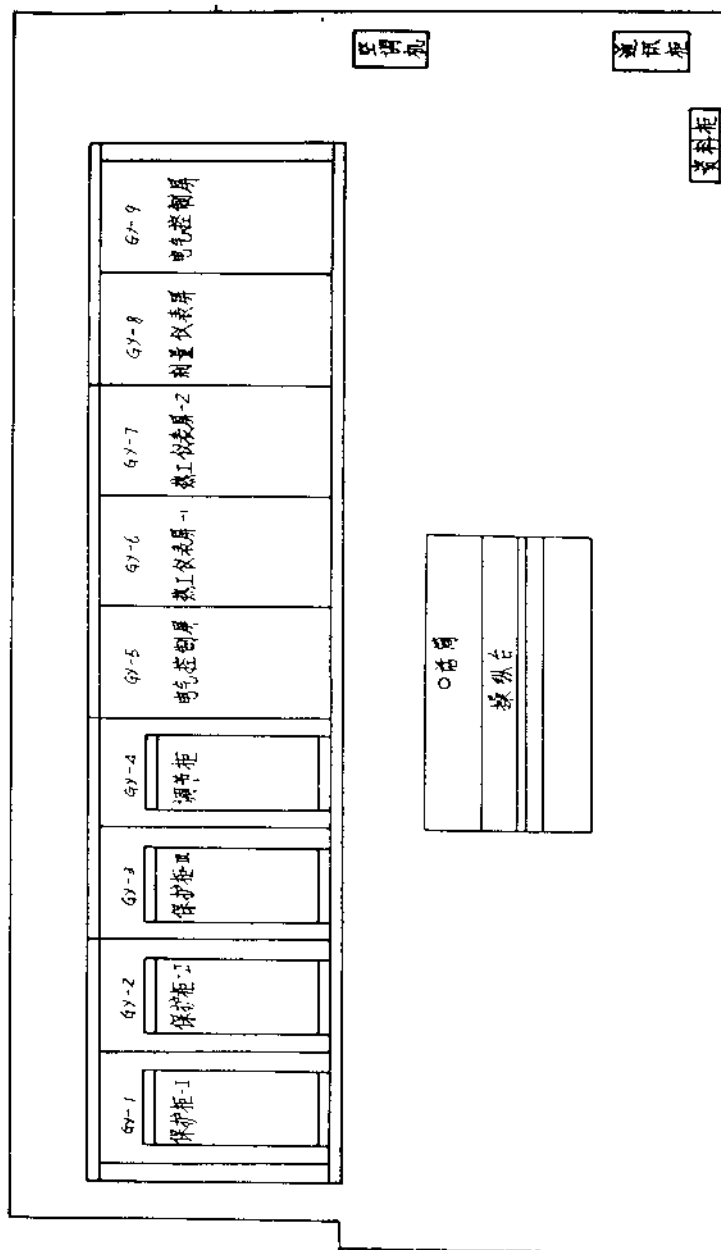


图 3 (a) 控制室布置图

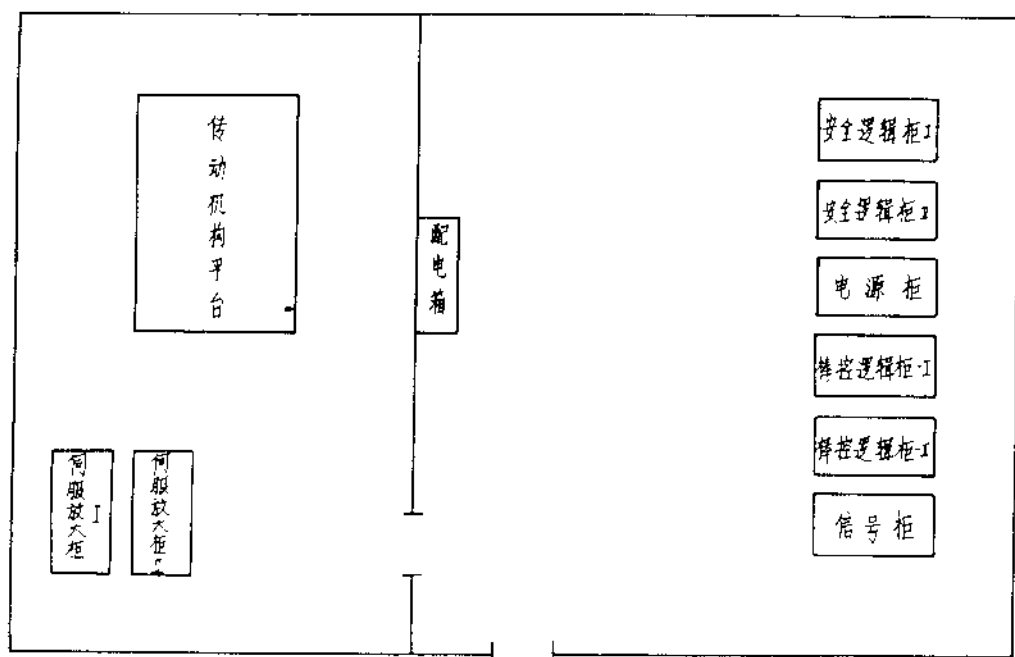


图 3b 310 房间机柜布置图

2.3.2 控制设备间

- (1) 设置机柜 8 个；
- (2) 机柜分别为：安全逻辑柜二个、棒控柜二个、信号柜一个、UPS 电源柜一个、调节伺服柜二个。

2.3.3 设备（机柜）安装

- (1) 重新改造地面，以安装抗震机柜（先进行抗震强度校核计算）。
- (2) 设置保护系统线缆专用走线槽。

3 整治完成后的新控制保护系统

3.1 新控制保护的组成

- | | |
|---------------|-------------------|
| (1) 保护系统； | (2) 功率保护监测系统； |
| (3) 周期保护监测系统； | (4) 功率测量系统； |
| (5) 功率自动调节系统； | (6) 棒控系统； |
| (7) 启动电离室系统； | (8) 供电及 UPS 电源系统； |
| (9) 信号系统； | (10) 广播系统。 |

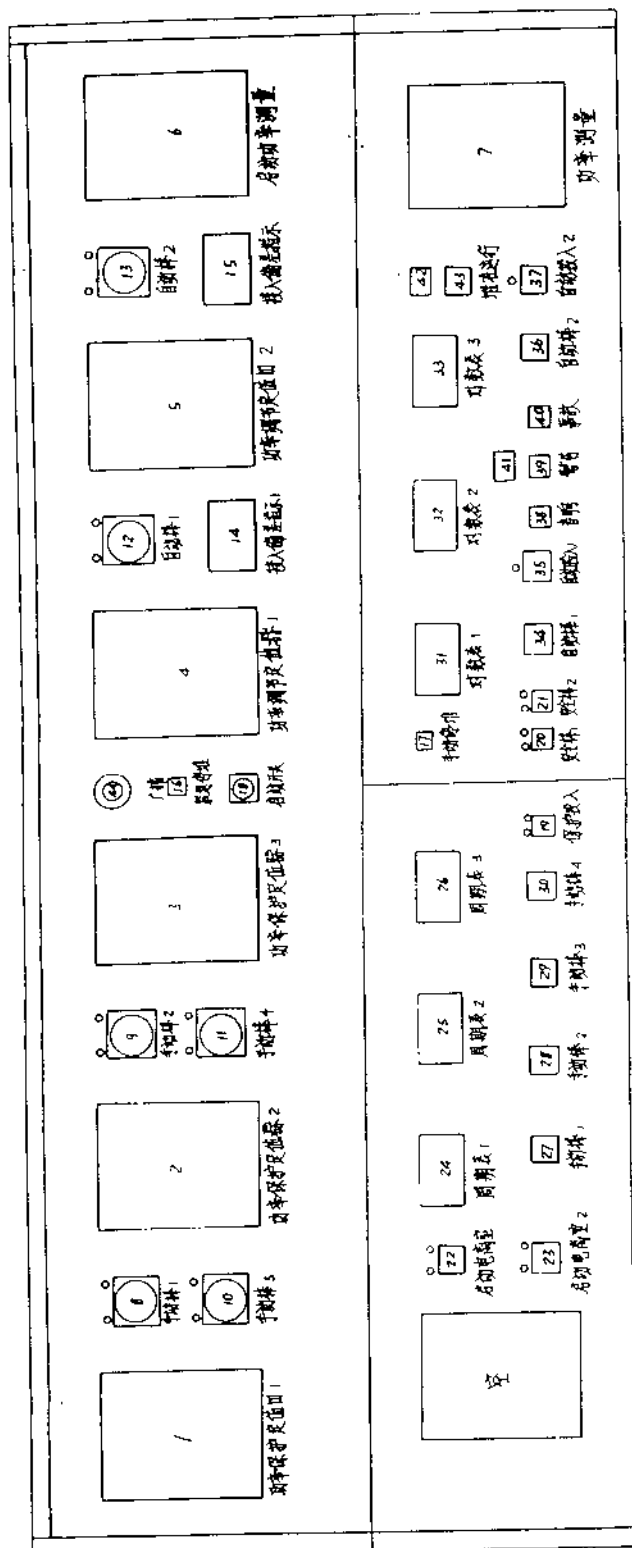


图 3 (c) 操纵台面板布置图

编号	名称	编号	名称	编号	名称	编号	名称
1	1 st 频率保护定值器	13	1 st 频率扩大继电器	25	2 nd 频率工作选择开关	37	2 nd 频率工作选择开关
2	2 nd 频率保护定值器	14	2 nd 频率扩大继电器	26	3 rd 频率工作选择开关	38	3 rd 频率工作选择开关
3	3 rd 频率保护定值器	15	3 rd 频率扩大继电器	27	1 st 频率工作选择开关	39	1 st 频率工作选择开关
4	1 st 频率扩大继电器	16	1 st 频率工作选择开关	28	2 nd 频率工作选择开关	40	2 nd 频率工作选择开关
5	2 nd 频率扩大继电器	17	2 nd 频率工作选择开关	29	3 rd 频率工作选择开关	41	3 rd 频率工作选择开关
6	3 rd 频率扩大继电器	18	3 rd 频率工作选择开关	30	1 st 频率工作选择开关	42	1 st 频率工作选择开关
7	1 st 频率工作选择开关	19	保护投入按钮	31	1 st 频率工作选择开关	43	1 st 频率工作选择开关
8	1 st 频率工作选择开关	20	1 st 频率工作选择开关	32	2 nd 频率工作选择开关	44	2 nd 频率工作选择开关
9	2 nd 频率工作选择开关	21	2 nd 频率工作选择开关	33	3 rd 频率工作选择开关		
10	3 rd 频率工作选择开关	22	3 rd 频率工作选择开关	34	1 st 频率工作选择开关		
11	1 st 频率工作选择开关	23	1 st 频率工作选择开关	35	2 nd 频率工作选择开关		
12	1 st 频率工作选择开关	24	1 st 频率工作选择开关	36	2 nd 频率工作选择开关		

3.2 新控制保护系统的性能改善及主要指标（概况）

整治完成后的新系统与老系统有哪些不同，性能如何？从以下二个图表做一些比较。

（1）新、旧系统的比对（见表1）

通过比对表中所列项目性能，可见新系统比旧系统有了许多改进和完善。增设了新的设备、功能。新系统的设计在应用核安全法规、标准、新技术方面是成功的，系统的安全性、可靠性得到很大的提高。

（2）测量、监测装置的完善与性能（见图4）

新系统的监测装置较旧系统完善，新系统的测量装置的灵敏度比旧系统提高了1~2个量级。新系统的测量不存在盲区，且有较多的冗余系统，显然其安全和可靠性得到很大的改善与提高。

（3）功率自动调节系统的改进

调节系统的更新：以振荡线性化环节的脉冲调宽放大器取代交磁伺服放大器；定值器与放大器全部用性能优良的运算放大器，定值器定值电流由 10^{-7} A 扩展为 10^{-9} A，系统性能优良。见系统性能指标图5、图6。

系统品质指标为：在整定参数下：扰动 $\delta_k=0.1\%$

和10%的给定功率阶跃下： $t_s \leq 1.7$ s ($e_{ss} \leq 1\%$ 时)

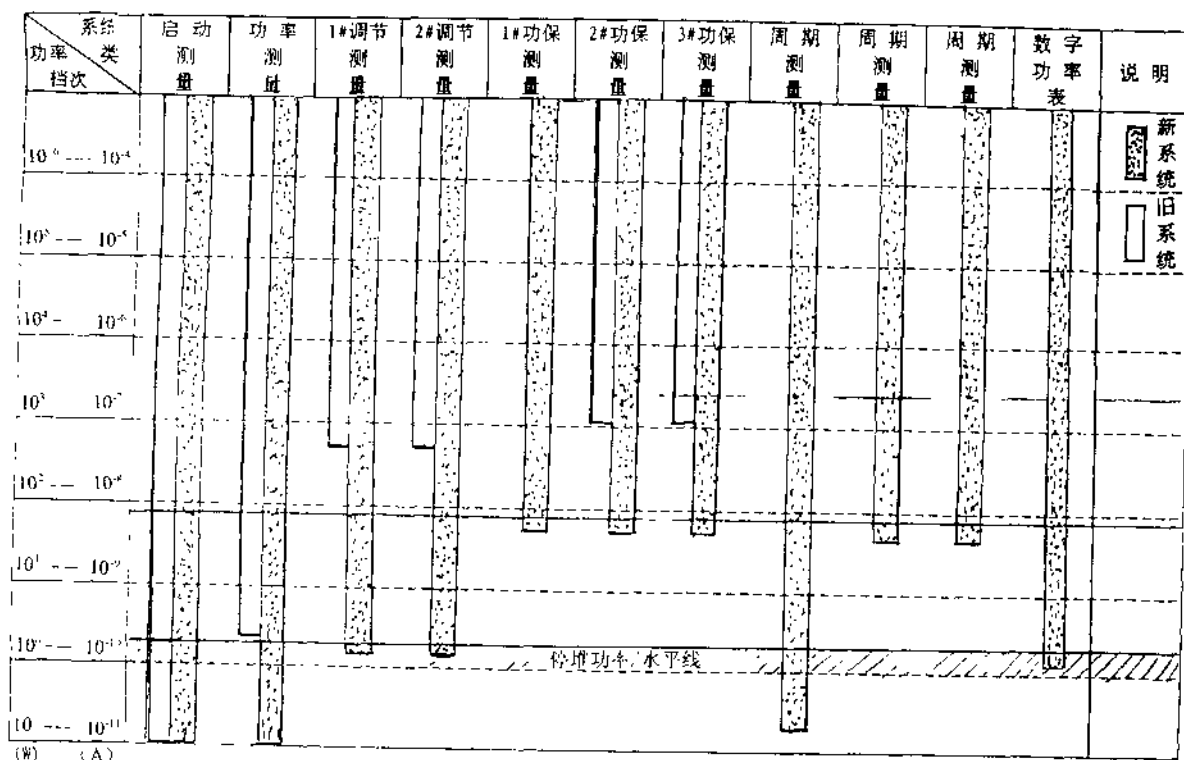


图4 游泳池堆控制保护系统新旧测量装置比对表图

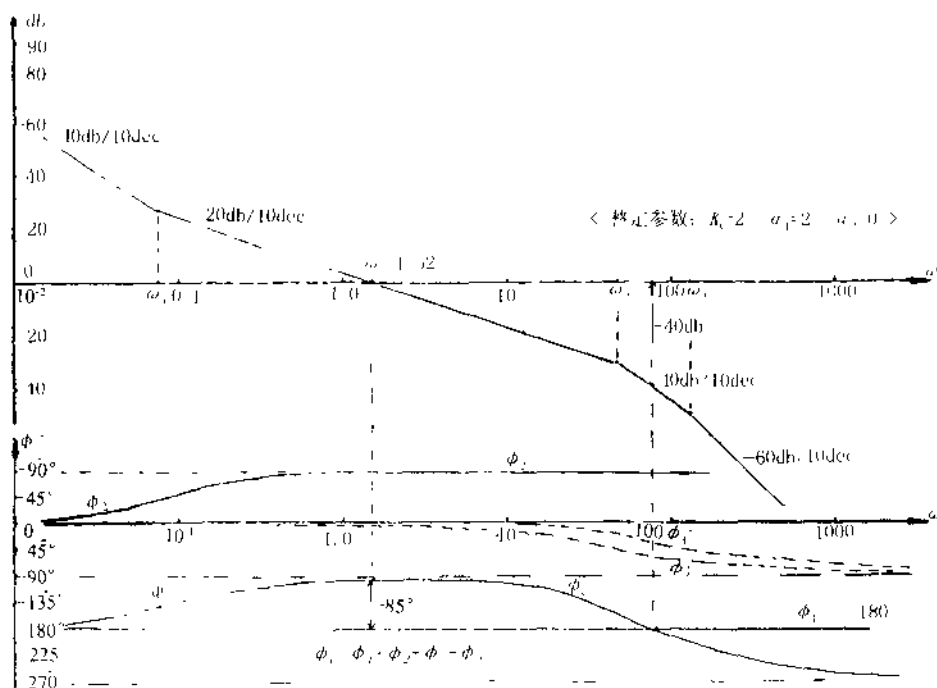


图 5 SPR-492 自动调节系统幅相频率特性图

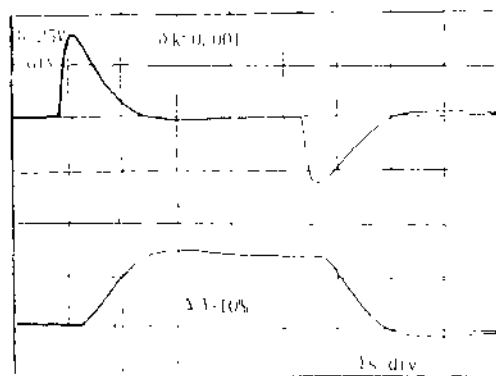


图 6 系统响应曲线

表 1 游泳池堆控制保护系统整治前后对比表

系统设置与 技术措施	老系统	新系统 (整治后)	性能及优点	说 明
(1) (保护参数) 变量设置	(1) 功率 $\geq 120\%$; (2) 一次水流量 低; (3) 一次水泵停; (4) 二台功率保护 仪器故障; (5) 试验回路故 障。	增加: (1) 周期 $\leq 10''$; (2) 游泳池水位 低; (3) 周期保护仪器 故障 (共 8 个保护 变量)。	(变量) 多样性原则, 冗余 原则, 可靠性, 安全性增 加。	(功能多样化 原则)

续表 1

系统设置与技术措施	老系统	新系统 (整治后)	性能及优点	说 明
(2) 安全保护通道设置	一个通道	二个(互冗)并行通道	冗余原则, 提高保护动作可靠性, 增加安全性。	
(3) 停堆驱动器电路	一个	二个相同停堆驱动电路	冗余原则, 提高可靠性, 增加安全性。	
(4) 停堆按钮	一个手动停堆按钮	二个停堆按钮, 增加紧急停堆按钮	冗余、手动触发原则, 提高停堆可靠性, 安全性。	
(5) 周期保护系统	无	三套独立的监测装置, 2/3 符合逻辑	变量多样性, 冗余、符合技术, 旁通、增加安全性, 可靠性。	
(6) 功率保护系统	二套监测装置 (1/2)	增为三套触立的系统 (2/3)	冗余, 符合技术, 旁通, 增加安全性和可靠性。	
(7) 游泳池水位低监测装置	无	设置一套监测装置	功能多样性原则, 增加安全性。	
(8) 一次水流量低监测装置	总流量, 分流量, 2/2 符合保护。	总流量, 分流量, 1/2 符合保护。	增加安全性 (可靠性)。	
(9) 一次水泵停监测装置	一套	二套相同装置输出二组信号	冗余, 增加可靠性、安全性。	
(10) 功率保护仪器故障	二套仪器故障	2/3 符合故障停堆	冗余, 增加可靠性。	
(11) 周期保护仪器故障	无	2/3 符合故障停堆	提高安全性和可靠性。	
(12) 不间断电源系统	无	设 UPS 不间断电源系统供保护系统及全部棒控电源及功测电流表电源	全部电源丧失后, 指示堆功率, 保证全部棒下降到底, 增加可靠性和安全性。	可省去可靠电源机组供电, 又可减少设备及维修工作与成本。
(13) 设数字功率表	无	设一套	人因工程 (直观)。	
(14) 补偿棒提升限制	无	$T \leq 20''$ 时, 切断补偿棒提升电源。	限制反应性加入速度, 增加安全性。	
(15) 保护系统仪器在役自巡检	无	周期保护, 功率保护仪器, 设故障自巡检。	增加在役检查手段, 消除隐患, 增加可靠性和安全性。	
(16) 安全保护通道在役巡检装置	无	设脉冲巡检装置	随时手动或自动检测安全通道有效性, 增加可靠性和安全性。	
(17) 自动功率调节系统	陈旧, 交磁机放大, 真空管放大器。	全新的环节系统, 线性化振荡环节取代交磁机伺服放大。	噪声、功耗减少, 可靠性与灵敏度提高, 系统稳定性等品质优良。	自动工作范围向小功率展宽二个量级, 方便运行。

续表 1

系统设置与技术措施	老系统	新系统 (整治后)	性能及优点	说 明
(18) 测控仪器	元器件性能不佳	重新设计, 更新。	新型元器件, 性能优良, 稳定性, 可靠性和精度提高。	测量灵敏度均提高 1~2 个量级。
(19) 测控电缆	老化, 陈旧	电离室电缆, 控制电缆, 电源线全部重新敷设。	安全和可靠性提高。	
(20) 单一故障准则	(无要求)	保护, 安全装置基本满足	提高安全性。	
(21) 隔离技术	无标准与要求	进行空间、实体隔离, 安全通道, 保护监测装置均做到。	有利实施单一故障, 减少系统故障, 防火, 提高可靠性与安全性。	
(22) 防火技术	(基本未考虑)	隔离, 封闭, 阻燃导线(保护装置)。	有利系统安全, 可靠性提高。	
(23) 抗震技术	厂房土建设防	系统机柜选用抗震框, 安装均予以考虑和设防。	有利防震安全, 提高安全性。	(进行安装后抗震校核计算)
(24) 电缆专用槽	无	设置保护系统电缆专用走线槽。	做到独立、隔离、防火, 提高可靠性与安全性。	
(25) 控制电路逻辑		尽可能采用负逻辑电路。	抗干扰好, 沿用国际通用做法。	
(26) 接近管理装置	无	设安全系统钥匙开关。	有利堆安全管理。	

超调 $\leq 1\%$

$M_p \leq 13.3\%$

$e_{ss} \leq 1\%$ 无振荡。

增益裕量 $=40\text{ dB}$

相位裕量 $=85^\circ$

以上指标均优于设计及工程要求指标

(4) 应用 UPS 不间断电源为后备安全电源

多次模拟在厂房内外电源全部丧失时, UPS 系统自动向控制保护系统供电, 使反应堆可靠停止, 并指示堆功率。

其优点: 提高了停堆的安全性, 可以省去可靠机组电源向保护系统供电, 节省设备及经费开支。

(5) 控制保护系统运行情况:

三年运行实践、以及人为各种检查试验均未发生系统功能失常和不正常工况。系统故障率极小、安全性与可靠性良好已由运行实践所证明。

4 结束语

安全整治把一个 60 年代建造的老堆的控制保护系统改造为基本符合核安全法规与标准的、安全可靠良好的国内较先进的试验堆控制保护系统,表明堆控制保护系统安全整治是成功的。与国外试验研究堆的改造相比,在采用新技术、新的工程设计思想,执行核安全法规标准方面,整治工程及装置系统仍具有现代水平。

整治后的控制保护系统,为反应堆的安全、科研、生产做出新的贡献,其经济效益和社会意义较大。同时整治的成功,也为后续堆的安全整治及新型试验堆工程提供借鉴与经验。

但是,需要客观地看到,整治工程,因老堆的现场条件的限制(如场所、空间的限制),其难度较大,致使系统的结构还不可能尽善尽美地满足维修可达性要求。

参 考 文 献

- 1 国家核安全局,中华人民共和国核安全法规汇编,中国法制出版社,1995(6):402~436
- 2 中国核工业总公司,EJ603-9,《试验堆安全系统准则》,中国标准出版社,1992:1~6
- 3 绪方胜彦,现代控制工程,科学出版社,1981:285~404
- 4 大众翻译组,逻辑设计手册,科学出版社,1972:35~154

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1964-1



9 787502 219642 >