

CPR1000 核电厂安全壳过滤排放系统的设计改进

赵 鑫, 叶子青, 陈 丽, 沈仁敏

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518057

摘要 结合中国改进型百万千瓦级压水堆(CPR1000)核电厂工程实际,从提升安全壳过滤排放系统(EUF)在严重事故后的可用性,以及提高核电机组的安全可靠性两方面进行研究,提出 CPR1000 核电厂 EUF 系统设计改进方案,分析总结 EUF 系统改进要点。通过新增一套系统及改进系统的布置方式,增强系统运行的独立性以及提升系统抗震性能。同时分析系统设计改进造成的影响并提出相应对策。

关键词: 安全壳过滤排放系统;改进;独立;抗震

中图分类号: TM623 **文献标志码**: A

0 引 言

目前在建和已建的中国改进型百万千瓦级压水堆(CPR1000)核电机组安全壳过滤排放系统(EUF)为双堆共用,但其只能满足单台机组排放的容量,而且未考虑抗震要求。原有的设计没有考虑同一核电厂的 2 台机组或多台机组同时发生严重事故的情况。

2011 年日本福岛核事故后,业界对因地震等自然灾害引发核电厂多机组同时发生严重事故的应对措施更加重视,中国核安全局专家也明确提出了在建和已建的 CPR1000 核电机组设计必须考虑对严重事故缓解能力的要求。对于 CPR1000 核电机组按双堆共用设计的 EUF 系统,一旦 2 台机组同时发生严重事故,虽然可以轮流手动开启安全壳隔离阀来对安全壳进行卸压排放,在一定时间内能够满足安全壳泄压需求,但为了保障 EUF 系统在严重事故后的可用性,提高核电机组的安全可靠性,EUF 系统有必要进行设计改进。

本项目结合工程实际,从提升 EUF 系统在严重事故后的可用性、提高核电机组的安全可靠性出发,以 CPR1000 某机组 EUF 系统单堆改进为目标,研究并进行 EUF 系统改进布置方案设计。

1 核电厂安全壳过滤排放系统概要

核电厂安全壳是防止放射性物质释放到环境

中的最后一道屏障,当严重事故发生后,安全壳内的压力逐渐升高,最终可能会破坏安全壳的完整性,造成放射性物质的外泄。EUF 系统通过主动卸压使安全壳内的压力不超过其承载限值,从而确保安全壳的完整性。同时,通过安装在卸压管线上的过滤装置对排放气体的放射性物质进行过滤,使排放到环境中放射性剂量在环境允许范围内。

EUF 的系统管道分别自 2 台机组的反应堆安全壳引出,至核辅助厂房房顶会合,通过 1 根管线进入成套过滤设备房间与文丘里水洗器相接;文丘里水洗器与金属纤维过滤器相连。系统排出管线从金属纤维过滤器引出经限流孔板、爆破膜后,经过安全壳过滤卸压排放活度监测装置(KRTMA513_514MA)最终通向电厂烟囱。CPR1000 核电机组 EUF 系统流程见图 1。

2 安全壳过滤排放系统设计改进方案

在对日本福岛核事故进行充分总结的基础上,本文结合国内核电工程实际,依据本领域相关设计规范及要求,提出了 EUF 系统设计改进方案。主要改进原则为双堆共用 EUF 系统配置改为单堆 EUF 系统配置;非抗震设计改为抗震设计。

2.1 双堆共用 EUF 系统配置改为单堆配置

基于该原则,提出 2 种实施方案,具体如下。

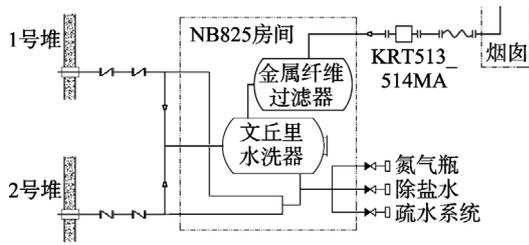


图1 CPR1000 核电机组 EUF 系统流程简图
Fig. 1 EUF Flow Diagram of CPR1000 Project
NB—核辅助厂房的 B 区

(1) 方案一：共用排放活度监测装置

新增一套过滤装置为 1#机组专用，原成套过滤装置改为 2#机组专用。2 套机组排气管线在进入 KRT513_514MA 前汇合，为了防止双堆发生严重事故后同时排气时气流速度过高，将排放母管的管径由 DN400 增大为 DN550。将原过滤器过滤装置到 1#机组的废液回流管线改到新增加的专为 1#机组设置的过滤装置下。KRT513_514MA

监测装置以及化学加药装置为两机组共用，此改进方案实现了系统单堆配置，不影响双机组同时发生严重事故时双堆同时排放的安全要求。方案一的系统流程见图 2。

(2) 方案二：独立排放活度监测装置设计

在方案一的基础上，方案二取消从过滤器出来的 2 条排气管道上的止回阀，每台机组配置一套 KRT513_514MA。KRT513_514MA 前后管道的管径仍为 DN400，2 台机组的排气管线分别接入烟囱，在烟囱内汇合至母管排向大气。方案二的系统流程见图 3。

(3) 2 种改进方案比选

基于核电厂设计的特殊性，及目前 CPR1000 的成熟性，为保证改进最终目标的基础上，降低和解决改进设计中的困难，本文从多方面进行了方案对比，见表 1。

通过表 1 可以看出，方案一和方案二都在单

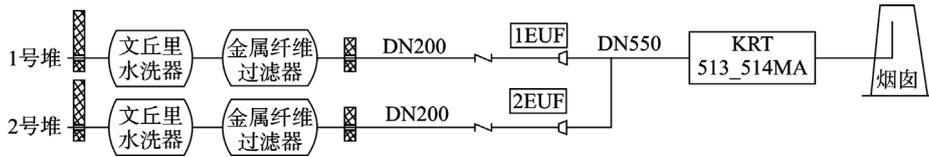


图2 方案一系统流程简图
Fig. 2 EUF Flow Diagram of Scheme 1

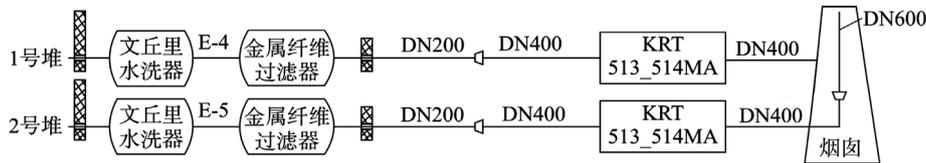


图3 方案二系统流程简图
Fig. 3 EUF Flow Diagram of Scheme 2

表 1 EUF 系统改进方案与原方案比较

Table 1 Comparison of Two Schemes

比较项目	原方案	方案一	方案二
增加设备	—	文丘里水洗器、金属纤维过滤器、2 个止回阀	文丘里水洗器、金属过滤器、KRT513_514MA
增设管道	—	安全壳到 KRT513_514MA 之前的管线、液体回流管线	安全壳到电厂烟囱之前的管线、液体回流管线
系统配置	双堆共用系统	单堆独用过滤单元，双堆共用 KRT513_514MA 监测单元，共用充排液管线	单堆独用过滤单元及 KRT513_514MA 监测单元，双堆共用充排液管线
双堆同时发生事故时，系统运行独立性	较差，需要分别手动交替启闭 2 台安全壳隔离阀，为两堆卸压排气	部分独立	完全独立
布置难度	—	较容易	需考虑 2 台 KRT513_514MA 布置
设备采购	—	KRT513_514MA 由于接口管径及监测容量变化需要重新评估、设计、论证，设备采购存在风险	易采购
经济性	—	较好	较差

堆应对严重事故能力上有所改进和提高。方案一在经济性及设备布置上优于方案二,但是 KRT513_514MA 作为独家供货的进口设备,其进出口接管管径调整难度较大,监测能力也需要重新设计,该设备的研发、制造和采购对方案造成较大制约。方案二虽然需要多采购 1 台 KRT513_514MA,并且其布置方式相对复杂,但是此方案可以充分满足系统改进功能要求,同时也避免了修改 KRT513_514MA 进出口管道尺寸及监测容量这一短期无法解决的制约因素,将设计的主动权掌握在己方手中,规避了方案一中的不足,易于方案的实施。综合考虑,以方案二展开下一步设计。

2.2 非抗震设计改为抗震设计

原 CPR1000 核电机组的 EUF 是按照非抗震要求设计的,除安全壳隔离功能的部分设备(安全壳贯穿件管道和安全壳隔离阀)为抗震设计外,系统其余设备均没有抗震设计。改进后将提升 EUF 系统设备的抗震级别,将事故后需要操作的设备抗震级别提升到 1A 类;事故后需要执行其功能的设备抗震级别提升到 1F 类;系统运行时需要保持完整性的阀门、管道的抗震级别提升到 II 类,以满足系统更高的抗震要求。

在设备采购技术规格书中增加新的抗震要求,使得设备供应商按新的抗震等级设计制造设备;对系统管道、支架及管部件按照提升后的抗震等级进行初步设计并进行力学校核,计算过程中增加相应的地震荷载,根据计算结果调整支架或管道布置,最终使得布置方案满足提升后的地震荷载下的应力要求。

3 方案实施及影响分析

3.1 方案实施

根据改进后的系统要求,对主要构筑物及设备、工艺管道进行布置。

3.1.1 主要构筑物及设备布置 原成套过滤器房间的文丘里水洗器和金属纤维过滤器以及附属设备作为 2#机组的专用成套过滤装置,其布置位置不变。在原成套过滤器房间靠 NA 区一侧新增一个为 1#机组专用的成套过滤器房间,其房间内的布置与 2#机组相同。

原 KRT513_514MA 监测装置作为 2#机组 EUF 系统专用的监测装置,其位置不变,新增

KRT513_514MA 监测装置作为 1#机组 EUF 系统专用监测装置,布置在 2#机组连接厂房新增的 +29.6 m 层。(注:文中涉及标高均为核电厂的厂坪相对标高。)

化学加药装置作为整体可移动式设备,布置位置不变。

3.1.2 管道布置 1#机组的排气管从安全壳隔离阀出来后,直接连接到新增的文丘里水洗器上,2#机组排气管单独连接到原文丘里水洗器上;两路管线分别经过 2 套过滤设备,从金属纤维过滤器出来在过滤器房间外变径后分别进入对应机组的 KRT513_514MA,通过金属软管分别与电厂烟囱连接,并在烟囱内合并成 1 根 DN600 的管道通向大气。

1#、2#机组废液回流管道分别在对应的成套过滤器房间内下穿楼板,在 22 m 层楼板下布置至 1#、2#机组安全壳附近,接入排气管,将 2 台机组文丘里水洗器中的废液分别排放至对应号机组安全壳内。

将原充排水管道在核辅助厂房顶部通过三通分成两路,分别通过金属软管给 2 套过滤器房间的文丘里水洗器补充排放溶液。

3.2 影响分析

3.2.1 力学影响分析 对改进后系统管道按照新的抗震要求进行力学校验,部分管段应力不能通过。调整在力学计算中不能通过的管段的支架形式或支架点位置,即可满足要求。

3.2.2 土建结构影响分析 EUF 系统单堆配置设计改进后,新增成套过滤器房间下部的支撑墙、楼板荷载过重,需要增加配筋。改进新增荷载基本不影响此层楼层反应谱。另外,新增 KRT513_514MA 监测装置房间对原设计的楼板截面尺寸及配筋基本无影响。

3.2.3 暖通影响分析 新增成套过滤器房间占用原设计暖通风管位置,需将风管并排移至进气室和新增成套过滤器房间之间的空地,从与烟囱排出管对立的侧墙接入排气室。新增房间内不需要设置通风设施,根据厂址环境条件,适当设置冬季采暖设施。

4 结束语

EUF 系统改进方案很好地提高整个系统的抗震性能,有效地提升了核电厂严重事故缓解能力

和可靠性，对降低机组在严重事故工况下可带来的安全风险有积极作用。同时，本文指出了系统改进对相关区域的布置、土建结构设计、暖通系

统设计等带来的影响，为我国核电厂持续进行的系统改进设计提供重要参考。

Analysis on Modification of Containment Filtration and Exhaust System of CPR1000

Zhao Xin, Ye Ziqin, Chen Li, Shen Renmin

China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518057, China

Abstract: Based on the practical engineering of the CPR1000 Nuclear Power Plant, this paper presents the layout improvement of the containment filtration and exhaust system. System independence of single unit and the aseismic performance is optimized by doubling the systems and improving the arrangement, which promotes the safety performance and reliability after severe accidents. The effect of the improvement and the relevant solutions are also considered. The summary and feasible analysis will offer a reference for the system design of following nuclear power station.

Key words: Containment filtration and exhaust system, Improvement, Aseismic, Independence

作者简介：

赵 鑫（1987—），女，助理工程师。2009年毕业于西安科技大学建筑环境与设备工程专业，获学士学位。现从事核电厂核岛工艺设计工作。

叶子青（1982—），男，工程师。2005年毕业于太原理工大学热能与动力工程专业，获硕士学位。现从事三代核电技术研发工作。

陈 丽（1979—），女，工程师。2007年毕业于哈尔滨工程大学核能科学与工程专业，获硕士学位。现从事厂核岛系统工艺设计工作。

（责任编辑：刘 君）