

非能动

概念与技术

周涛 主编
陈娟 李宇 宋明强 副主编



清华大学出版社

非能动

概念与技术

周涛 主编
陈娟 李宇 宋明强 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以非能动概念为先导,以先进的非能动技术和系统应用为案例,概括介绍了目前应用于能源电力领域的非能动技术。通过对其进行分类及分析,阐明了非能动系统的功能特征,提出了非能动系统的本质定义,讨论了非能动概念的时空相对性,陈述了广义非能动系统的设想及相关研究内容。

本书可作为工程参考书或培训教材,也可供新能源工程、热能工程、核能工程等相关学科专业的大一新生,及对非能动技术感兴趣的其他专业学生作为教材使用,还可作为卓越工程师和创新型人才培养的教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

非能动概念与技术/周涛主编. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-39438-9

I. ①非… II. ①周… III. ①新能源—研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 045494 号

责任编辑:杨 倩 赵从棉

封面设计:陈国熙

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:11

字 数:268 千字

版 次:2016 年 6 月第 1 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:35.00 元

产品编号:049436-01

◀ 前 言

随着能源工业的发展,非能动技术在能源工业特别是在核能领域开始担当重要角色。非能动系统的非能动安全性也得到不断重视,随着其在能源工业中发挥了越来越多的作用,非能动理论和方法也开始得到不断发展。本书概括了目前应用于能源电力领域的非能动技术,通过对其进行分类及分析,阐明了非能动系统的功能特征,提出了非能动系统的本质定义,讨论了非能动概念的时空相对性,陈述了广义非能动系统的设想及相关研究内容。

本书共12章,其中第1章讲述了非能动技术的概念;第2章介绍了非能动技术的类型;第3章主要讲述了火电系统中的非能动技术;第4章介绍了二代和二代加核电系统中的非能动技术;第5章介绍了三代及先进核电中的非能动技术;第6章介绍了四代核电中的非能动技术;第7章介绍了其他堆型中的非能动技术;第8章介绍了太阳能系统中的非能动技术;第9章介绍了生物质能源中的非能动技术;第10章介绍了风能中的非能动技术;第11章介绍了水能中的非能动技术;第12章介绍了其他新能源发电系统中的非能动技术。

本书以非能动概念为先导,以先进的非能动技术和系统应用为案例,可作为工程参考书或培训教材。本书的知识领域涉及基础物理化学、流体力学、传热学、热工测量等基础知识,可供新能源工程、热能工程、核能工程等相关学科专业的大一新生及对非能动技术感兴趣的其他专业新生使用,也可作为卓越工程师和创新型人才培养的教材。

本书第1~3章由周涛、李精精编写;第4章由周涛、汝小龙、李宇编写;第5~6章由周涛、段军、霍启军编写;第7章由宋明强、陈娟编写;第8章由李精精编写;第9章由宋明强编写;第10~11章由杨旭编写;第12章由李精精、李宇编写。全书由周涛和陈娟统稿,由李宇及宋明强等进行全书校对。此外,刘亮、琚忠云、林达平、李云博和周蓝字等协助查阅材料、输入文字及插图,为编著提供了很大帮助。在此一并表示衷心感谢。

编 者

2016年4月

第 1 章 非能动技术的概念	1
1.1 非能动技术的定义与效用	1
1.1.1 非能动技术的定义	1
1.1.2 非能动技术的效用	2
1.2 非能动技术概念的产生与发展	2
1.2.1 非能动技术概念的产生	2
1.2.2 非能动技术概念的发展	3
1.3 非能动技术的特征	6
1.3.1 非能动技术的内涵特征	6
1.3.2 非能动技术的外延特征	7
1.4 非能动技术的现有问题	9
1.5 非能动技术的发展方向	10
思考题	10
参考文献	10
第 2 章 非能动技术的类型	12
2.1 现有非能动技术的类型	12
2.1.1 非能动技术应用的分类	12
2.1.2 非能动技术性质的分类	13
2.1.3 非能动系统的子系统	14
2.1.4 广义非能动系统的构造	14
2.2 典型的非能动技术类型	15
2.2.1 自然循环	15
2.2.2 重力驱动	16
2.2.3 温差驱动	18
2.2.4 逆止阀	21
2.2.5 密度锁	25
2.3 飞轮储能非能动技术	27
2.3.1 飞轮储能的概念	27
2.3.2 飞轮储能的原理	27

2.3.3 飞轮储能的应用	27
2.4 其他非能动技术的类型	28
思考题	30
参考文献	30
第3章 火电系统中的非能动技术	31
3.1 自然循环锅炉非能动技术	31
3.1.1 锅炉自然循环的概念	31
3.1.2 自然循环锅炉的原理	32
3.1.3 自然循环锅炉的可靠性应用	33
3.2 烟气脱硫中的非能动技术	34
3.2.1 烟气脱硫中的非能动概念	34
3.2.2 烟气脱硫中的非能动原理	34
3.2.3 烟气脱硫中的非能动技术应用	35
3.3 火电中其他非能动技术	36
3.3.1 可吸入颗粒物脱除塔	36
3.3.2 可吸入颗粒物热泳脱除器	36
3.3.3 超速危急保安器	37
思考题	39
参考文献	39
第4章 二代和二代加核电系统中的非能动技术	40
4.1 压水堆非能动技术	40
4.1.1 CPR1000	40
4.1.2 VVER/WWER	46
4.1.3 CNP1000	50
4.2 沸水堆非能动技术	54
4.2.1 沸水堆的技术背景	54
4.2.2 沸水堆的技术特征	56
4.2.3 沸水堆非能动技术的应用	59
4.3 重水堆非能动技术	64
4.3.1 重水堆的技术背景	64
4.3.2 重水堆的技术特征	65
4.3.3 重水堆非能动技术的应用	69
思考题	72
参考文献	72
第5章 三代及先进核电中的非能动技术	74
5.1 AP1000 的非能动技术	74
5.1.1 AP1000 的技术背景	74
5.1.2 AP1000 的技术特征	75

5.1.3	非能动堆芯冷却系统	76
5.1.4	非能动余热排出系统	78
5.1.5	安全注射和卸压系统	79
5.1.6	非能动安全壳冷却系统	80
5.1.7	主控室应急可居留性系统	82
5.2	EPR 的非能动技术	83
5.2.1	EPR 的技术背景	83
5.2.2	EPR 的技术特征	83
5.2.3	非能动氢复合器	85
5.2.4	非能动熔融物冷却系统	86
5.3	ABWR 中的非能动技术	87
5.3.1	ABWR 的技术背景	87
5.3.2	ABWR 的技术特征	88
5.3.3	ABWR 安全壳系统	89
5.3.4	ABWR 的负反应性系数	90
5.4	“华龙一号”中的非能动技术	91
5.4.1	“华龙一号”的技术背景	91
5.4.2	“华龙一号”的技术特征	91
5.4.3	“华龙一号”研发进展情况	91
	思考题	92
	参考文献	92

第 6 章	四代核电中的非能动技术	94
6.1	四代核电发展历程	94
6.2	高温气冷反应堆	96
6.2.1	高温气冷反应堆的背景	96
6.2.2	高温气冷堆的非能动技术	97
6.3	超临界水冷反应堆	98
6.3.1	超临界水冷反应堆的背景	98
6.3.2	超临界水冷反应堆的非能动技术	99
6.4	熔盐反应堆	101
6.4.1	熔盐反应堆的背景	101
6.4.2	熔盐反应堆的非能动技术	102
6.5	气冷快中子反应堆	103
6.5.1	气冷快中子反应堆的背景	103
6.5.2	气冷快中子反应堆的非能动技术	104
6.6	钠冷快中子反应堆	104
6.6.1	钠冷快中子反应堆的背景	104
6.6.2	钠冷快中子反应堆的非能动技术	106

6.7 铅冷快中子反应堆	108
6.7.1 铅冷快中子反应堆的背景	108
6.7.2 铅冷快中子反应堆的非能动技术	109
思考题	110
参考文献	110
第7章 其他堆型中的非能动技术	112
7.1 ADS堆	112
7.1.1 ADS堆的技术背景	112
7.1.2 ADS堆的技术特征	113
7.1.3 ADS堆非能动技术应用	113
7.2 脉冲堆	115
7.2.1 脉冲堆的技术背景	115
7.2.2 脉冲堆的技术特征	116
7.2.3 脉冲堆非能动技术应用	116
7.3 行波堆	117
7.3.1 行波堆的技术背景	117
7.3.2 行波堆的技术特征	117
7.3.3 行波堆非能动技术应用	118
7.4 固有安全堆	119
7.4.1 固有安全堆的技术背景	119
7.4.2 固有安全堆的技术特征	119
7.4.3 固有安全堆非能动技术应用	119
思考题	121
参考文献	121
第8章 太阳能系统中的非能动技术	123
8.1 太阳能及其发电系统概述	123
8.1.1 太阳能发电及其特点	123
8.1.2 太阳能发电系统的类型	123
8.2 国内外太阳能系统发展现状	124
8.2.1 国外太阳能系统发展现状	124
8.2.2 国内太阳能系统发展现状	125
8.3 太阳能非能动技术的分类与特征	126
8.3.1 太阳能非能动技术概述	126
8.3.2 太阳能非能动技术的应用原理	126
8.3.3 太阳能非能动技术应用分类	128
8.4 非能动技术在太阳能系统中的应用	130
8.4.1 被动式太阳房	130
8.4.2 主动式太阳房	131

8.4.3 零能房屋	132
8.4.4 绵阳小学太阳能系统	133
思考题	135
参考文献	135
第9章 生物质能源中的非能动技术	136
9.1 生物质发电概述	136
9.1.1 生物质发电及其特点	136
9.1.2 生物质发电类型	136
9.2 国内外生物质发电发展现状	138
9.2.1 国外生物质发电技术发展现状	138
9.2.2 国内生物质发电技术发展现状	139
9.3 非能动技术在生物质发电中的应用	139
9.3.1 非能动技术在直接燃烧发电中的应用	139
9.3.2 非能动技术在汽化发电中的应用	140
9.3.3 非能动技术在垃圾焚烧发电中的应用	142
思考题	142
参考文献	143
第10章 风能中的非能动技术	144
10.1 风电概述	144
10.1.1 风力发电及其特点	144
10.1.2 风力发电的类型	144
10.2 国内外风力发电现状	145
10.2.1 国外风力发电现状	145
10.2.2 国内风力发电现状	146
10.3 非能动技术在风力发电中的应用	147
10.3.1 飞轮储能装置中的非能动技术	147
10.3.2 叶片中的非能动技术	148
10.3.3 调速或限速装置中的非能动技术	148
10.3.4 油系统止回阀中的非能动技术	149
思考题	150
参考文献	150
第11章 水能中的非能动技术	151
11.1 水力发电概述	151
11.1.1 水力发电及其特点	151
11.1.2 水力发电的类型	151
11.2 国内外水力发电现状	152
11.2.1 国外水力发电现状	152
11.2.2 国内水力发电现状	153

11.3 非能动技术在水力发电中的应用	153
11.3.1 水轮机中的非能动技术	153
11.3.2 油系统中的非能动技术	154
11.3.3 气系统中的非能动技术	155
11.3.4 水系统中的非能动技术	157
思考题	158
参考文献	158
第12章 其他新能源发电系统中的非能动技术	159
12.1 潮汐能发电系统	159
12.1.1 潮汐能发电的技术背景	159
12.1.2 潮汐能发电的技术特征	161
12.1.3 潮汐能发电非能动技术应用	161
12.2 地热发电系统	162
12.2.1 地热发电的技术背景	162
12.2.2 地热发电的技术特征	162
12.2.3 地热发电非能动技术应用	162
12.3 氢能发电系统	164
12.3.1 氢能发电的技术背景	164
12.3.2 氢能发电的技术特征	165
12.3.3 氢能发电非能动技术应用	165
思考题	165
参考文献	166



第 1 章 非能动技术的概念

非能动技术是进入 21 世纪以来工业技术研究的热门话题。非能动技术伴随能动技术而生,一直在能源工业领域内有所应用。近几年来,伴随着核电工业的发展,非能动安全技术更是成为先进核电的标志。包括火电、风电、太阳能等在内的能源技术也对非能动技术重新予以重视,非能动技术将在未来工业发展,特别是核电发展中扮演特殊重要角色。

1.1 非能动技术的定义与效用

1.1.1 非能动技术的定义

1. 一般定义

根据非能动系统的自能源特性,可提出非能动系统的定义:对于某一系统,如果其状态的改变(或维持)可完全依靠内部能量完成,而不需要外部质能输入,则此系统的变化过程为非能动过程。如果此过程的完成依赖于某种系统外在输入,如交流电(直流电)的驱动、冷却剂(润滑剂)的补充、系统动作的激活(控制信号)等,则该过程为能动过程。如果一个系统实现其功能的过程为非能动过程,则此系统为非能动系统,否则为能动系统。

一个系统包含非能动部件和能动部件。非能动部件是指,无须依赖外部输入而执行功能的部件。非能动部件内一般没有泵等依赖外部能源的组成部分,其功能的执行系在感受到某种参数,如压力、温度、流量的变化后完成。能动部件是指,依靠触发、机械运动或动力源等外部输入而行使功能,因而能以主动态影响系统的工作过程的部件。

2. 广义定义

如果一个系统其表象特征符合非能动特性(即具有高可靠性、简洁性及自动性,其功能所需能量来自于内部能量或其能源子系统,其时间和空间特性满足应用要求),则此系统定义为广义非能动系统。

与传统的非能动系统定义相比,该定义较为灵活,把系统功能作为定义的基础,这与工程期待一致。此定义有 3 个要点:①表象特征是判定系统广义非能动特性的根本判据;②广义非能动是相对性概念,需要说明其时间及空间约束条件;③要分辨能动与非能动,不能脱离系统功能,讨论一个功能低下的系统属于能动或非能动范畴是没有意义的,非能动只是设计手段而非最终目的。由此定义和非能动系统子系统的划分,可根据工程需要,构造符合标准的广义非能动系统。广义非能动系统可用以改善系统的可靠性,增加系统紧凑度和降低系统造价,这些都是由非能动系统的表象特征决定的。更进一步地讲,广义非能动系统

可用于那些希望系统具有非能动特性,而又迫于某种原因不能应用传统非能动技术的场合,以及改善那些只具有部分非能动特性的系统。

1.1.2 非能动技术的效用

非能动的概念广泛应用于核电站、被动式太阳能系统以及风能发电系统中。非能动系统只利用自然力,例如重力、自然循环和压缩气体等我们每天所依赖的简单物理学原理,不需要泵、风机、柴油机、冷却器或者其他旋转机械设备,从而也不需要安全交流电源。当一些简单的阀门自动开启后,它们将非能动安全系统连成一体。在大多数情况下,这些阀门都具有“失效保护”。它们需要能量来维持在正常的关闭位置,一旦失去能量它们将被打开,以进行安全调整。非能动系统和成熟部件的采用简化了总体电厂系统和设备及其运行和维护工作。

以 AP1000 核电站为例进行分析,其“非能动”安全系统有两大贡献。一是增强了 AP1000 型核电厂的固有安全性。通俗地说,安全系统是装水量总计 5000 余吨的 4 个大水箱,一旦遭遇紧急情况,不需要交流电源和应急发电机,利用地球引力、物质重力、气体膨胀、密度差引起的对流、蒸发、冷凝等自然现象来驱动核电厂的安全系统,巧妙地冷却反应堆堆芯,带走堆芯余热,并对安全壳外部实施喷淋等,从而恢复核电站的安全状态。这使得 AP1000 的安全性大大提高。二是事故发生后,允许核电站操纵员 72 小时不干预。目前世界上运行的核电站不干预时间仅为 10~30min,系统可以自动应对事故,把人为失误的风险降到最小。中国在建的三门核电站是全球首座采用美国西屋公司 AP1000 三代非能动技术的核电站。

AP1000 中的这些非能动安全系统比一般压水堆的安全系统简单得多。它们包含的部件大幅减少,从而减少了必需的测试、检查和维护工作。非能动安全系统的控制阀数量只是一般能动安全系统的 1/3,而且无须安全泵。同样重要的是,非能动安全系统不需要对原有核电厂、堆芯、反应堆冷却剂系统(RCS)或安全壳的其他设计做太大的变动。而且,非能动安全系统不需要一般核电厂能动安全系统所需的大型支持网络,包括交流电源、供暖、通风空调系统(HVAC)和冷却水,也不需要抗震厂房来容纳这些装置。非能动安全系统也符合美国核管会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)的单一故障准则,其高可靠性已经得到了概率风险评价(PRA)的证明。

1.2 非能动技术概念的产生与发展

1.2.1 非能动技术概念的产生

非能动技术的概念始于核电工业,但是非能动技术的应用却远远早于核电技术的产生。在火力发电方面,19 世纪初发明的火筒锅炉及 19 世纪中叶发明的水管锅炉都属于自然循环锅炉。在这类锅炉里,水汽在上升及下降管路中因受热情况不同,产生密度差导致回路中流体的自然循环流动。这属于自然循环类非能动技术,标志着非能动的自然循环技术被应用在能源工业上。

20 世纪 80 年代,国际原子能机构(IAEA)指出,非能动系统由非能动设备组成,依靠自然力(如重力或自然对流等)实现事故预防和缓解。在中国,国家核安全局也于 20 世纪 90 年代颁布了《核电厂质量保证安全规定》并明确了“非能动”的概念。

1.2.2 非能动技术概念的发展

1. 国外非能动技术概念的发展

1) 应用发展

在发展自然循环锅炉的同时,20世纪30年代开始应用直流锅炉和强制循环锅炉。强制循环锅炉在下降管中增加水泵,以加强蒸发受热面的水循环。直流锅炉没有锅筒,直接由泵将水送入省煤器。20世纪70年代又发明了27MPa压力配1300MW的超临界直流锅炉,后来又发明了直流锅炉和强制循环锅炉复合而成的复合循环锅炉。

伴随着锅炉技术的成熟,核电在此时登上历史舞台,而此时在核电中强制循环是当然的主导循环方式。随着核电的不断发展,二代核电中也采用了非能动自然循环技术。但在这个阶段,非能动的自然循环技术被置于从属或者不很重要的地位。

随着核电的技术的大规模应用,特别是核电发生了3次严重事故之后,人们对非能动技术也越来越重视。自20世纪80年代具有非能动安全特征的反应堆设计理念首次公开提出开始,先后涌现出了多种不同的设计方案。目前在现役核电站也采用了非能动安全技术。美国从AP600到AP1000发展了非能动反应堆,瑞典提出固有安全特性堆PIUS,欧洲的EPP1000、日本的SPWR、俄罗斯的WWER1000等都采用了非能动安全技术。目前,非能动技术得到空前重视,非能动技术被视为核电安全的大救星。

在太阳能系统及其他新能源系统中,非能动技术被称做被动式技术。人类利用太阳能虽然已有3000多年的历史,但把太阳能作为一种能源和动力加以利用,却只有不到400年的历史。非能动技术也是于近年来才开始广泛应用于太阳能系统中。此外,风能、生物质能等新能源近年来的快速发展也促使了非能动技术在其中的应用。

从非能动自然循环技术在能源工业中的发展历史可以看出,非能动的自然循环技术在人类开始时受制于当时技术水平是不得不采用的;后来随着人类对水泵技术完善应用,人们就转到功能更为强大的强制循环;后来,人们又应用非能动自然循环作为强制循环有益的补充;最后,发现非能动自然循环的可靠安全特性,又转向更多地应用非能动自然循环,并首先重视应用于高技术的核电产业。由此,可以看出,非能动技术历史是一种循环式的发展,即具有“螺旋式上升,波浪式前进”的特点。

2) 研究发展

(1) 实验研究

非能动技术目前已广泛应用于核能发电系统、太阳能发电系统等新能源发电系统中。西屋公司建造了许多中小型试验装置,在非能动安全壳冷却系统方面,完成了1/100模型的风洞试验、全尺寸安全壳穹顶1/8切块的水分配试验、6.096m直径和7.315m高的安全壳整体模型内自然对流和蒸汽冷凝试验、1/8规模的钢安全壳结构传热试验。西屋公司于1995年开始非能动先进压水堆AP600的开发研究工作,1998年9月3日NRC颁布了AP600最终设计批准书。之后西屋于1999年12月启动了AP1000的研究开发工作,历时5年开发了AP1000。

同时,欧洲开发了EPP1000,日本开发了SPWR,它们都是在AP600基础上发展的先进压水堆,采用与AP600一样的非能动安全技术,建造了一些试验装置进行相关试验,如欧洲建造了PASCO、NICE等单项试验装置,进行了非能动安全系统相关的原理性及单项试验。

俄罗斯的 WWER1000 是由俄罗斯自主开发的先进压水堆,其非能动余热排出系统采用与我国 ACP600 一样的空气冷却技术,并已完成了相关的试验。加拿大的 CANDU 堆也具有两套独立的非能动快速停堆系统。

(2) 程序研制

西屋公司的 AP1000、欧洲的 EPP1000、日本的 SPWR、俄罗斯的 WWER1000 等都采用了非能动安全技术。另外,目前在现役核电站也采用了非能动安全技术,如中压安全注射箱(ACC)等。AP1000 已获得美国核管会最终设计认可,其非能动安全系统主要包括应急堆芯冷却系统、非能动余热排出系统和非能动安全壳冷却系统、控制室非能动可居留条件保障系统等。西屋公司完成了 AP600 的初步设计和 FOAKE 工程设计及大量的试验研究,并在此基础上编制了分析计算程序。为获得核管会的认可,西屋公司建立了一些用于 AP600 非能动安全系统的大型整体效应试验装置,开发了系统安全分析程序,并用试验数据进行了验证。德国对非能动安全壳冷却系统所涉及的辐射换热模型和湍流模型进行了深入的研究,并将这些热工水力模型移植到 FLUTAN 程序中,使改进后的 FLUTAN 程序具有一定的分析非能动安全壳冷却系统的能力。

2. 国内非能动技术概念的发展

1) 应用发展

非能动技术在包括核能、太阳能等新能源发电系统中得到了广泛的应用与发展。我国各种发电系统中的非能动技术发展迅速。

首先,国内重视核电非能动技术的应用。中国核电技术的应用以压水堆为主,目前也开展了非能动技术广泛应用的第 3 代压水堆 AP1000 的建设工作。在二代压水堆中,余热排出系统也普遍采用非能动余热排出系统。其次,在火电方向,自然循环锅炉也得到了很好的应用,目前这些技术很多是借鉴国外的经验。在可再生能源方向上,国内也开展了较多的研究工作。近年来,被动式太阳能技术、水力发电技术、风能发电技术,乃至生物质发电技术都开始应用相关的非能动技术。特别是非能动技术在太阳能系统中的应用使得太阳能建筑在中国的发展环境日趋良好。1998 年 5 月 29 日中国签署加入《京都议定书》,2006 年 12 月 1 日批准施行《可再生能源法》,2007 年 8 月 31 日发布《中国可再生能源中长期发展规划》,2008 年 4 月 1 日正式实施《节约能源法》,2008 年 10 月 1 日开始实施《建筑节能条例》。“节能减排”“节能省地”成为建筑行业点击率最高的词语之一。这一切都在向人们昭示:中国的房屋建设及其能源问题已成为中国社会的全局问题,太阳能建筑在中国的发展逐渐受到社会各界的广泛关注。自 2012 年开始,雾霾开始进入人们的生活。雾霾污染一度成为焦点,特别是 2013 年,中国政府发布消息称国家将投资 50 亿元治理京津冀的雾霾。这无疑将促进非能动技术的发展,促进可再生能源的利用。

2) 研究发展

(1) 实验研究

“八五”计划期间,中国核动力研究设计院(Nuclear Power Institute of China, NPIC)先后开展了 AC600 的可行性研究、概念设计、总体设计以及总体优化设计。在“九五”计划期间,针对非能动安全壳冷却系统,进一步开展了初步设计工作,可以为开展综合试验研究提供相关条件。结合目前核电用户要求,NPIC 完成了 1000MW 级非能动先进压水堆的框架

设计。在 20 世纪 80 年代到 90 年代,中国核动力院、西南物理研究院及西安交通大学等对核电站二次侧非能动堆芯余热应急排放系统进行多次研究。中国的二代加改进型堆型都应用了非能动技术,中广核的 CPR1000 也更多地采用了非能动技术。中国核工业集团公司也研制了非能动特性反应堆 ACR600。“八五”计划期间,NPIC 开展了非能动安全系统的原理性实验研究,结果表明:①非能动余热排出系统和非能动安注系统的设计概念是正确的;②瞬态试验提出了微流量、液柱和注水启动等启动方式,而液柱启动和注水启动可能发生水锤现象;③在汽相、液相截然分开的界面系统,空气冷却器和蒸汽发生器之间存在着位差阈值,位差大于该阈值,对系统余热排出能力基本无影响;④堆芯补水箱(CMT)模拟体投入初期,存在质量流速的低位平台区;⑤从稳压器进入 CMT 模拟体内的蒸汽的强烈冷凝导致 CMT 模拟体内压力的脉动;⑥从稳压器进入 CMT 模拟体的蒸汽,在 CMT 模拟体内、外壁产生很大温差,破口越小,温差越大;⑦在导流板下端拐弯区存在大涡流区,产生大的流动阻力;⑧在风场的任何工况下,烟囱排出的气体都不可能二次吸入安全壳内。这些结论为系统和结构优化设计提供了重要的依据。

“九五”计划期间,中国核动力设计院开展了先进堆非能动安全系统关键技术研究,试验研究结果表明:①系统冷启动、热启动和注水未投入启动等方式均可带走堆芯衰变余热,但系统冷、热启动方式对自然循环过渡过程影响不大;②应急给水箱注水容易引起水锤现象的发生,但可通过增加注水温度或降低注水速度消除;③空气冷却器里大量冷水能有效降低压力峰值,应急给水箱的注水使蒸汽发生器压力在空气自然循环流动建立以前开始下降;④使用冷端压力平衡管和蒸汽平衡管,CMT 均能对反应堆压力容器注水和冷却;⑤使用冷端压力平衡管时,自动泄压系统(ADS)投入后,ACC 和低压安注系统更早投入,有利于反应堆的安全;⑥在小破口工况下,使用冷端压力平衡管时,CMT 水位不能下降,不能触发 ADS 有效开启;⑦饱和蒸汽在排放容器内的冷凝模式可分为蒸汽供应限制模式和蒸汽冷凝限制模式;⑧排放容器内的初始温度对排放延迟时间影响较大,初始温度越高,排放延迟时间越短。

NPIC 与德国 Karlsruhe 技术中心合作,改造其 PASCO 试验装置,进行了热板传热机理性试验。试验结果表明:①辐射换热对安全壳内余热排出的影响不可忽视;②壁面黑度对辐射换热影响较大,不同通道尺寸对传热影响较小;③壁面水膜的存在将极大增强换热效果。

AP1000 是一种先进的“非能动型压水堆核电技术”。2006 年年末,国家核电技术招标机构在经过长达 3 年的招标程序后,最终决定引进西屋电气的 AP1000 技术来建设浙江三门和山东海阳的 4 台百万千瓦级的核电机组。随着三门二号机组 CA01 的顺利就位,我国三代核电 AP1000 自主化依托项目 2010 年度 18 个节点任务全部完成。

在消化、吸收、全面掌握我国引进的第三代先进核电 AP1000 非能动技术的基础上,通过再创新开发出具有我国自主知识产权、功率更大的非能动大型先进压水堆核电机组 CAP1400 型压水堆核电机组。目前,示范电站初步可行性研究文件已通过评审,可行性研究报告已编制完成。根据工作计划,2013 年 1 月份发布开工令,2013 年 4 月 30 日浇灌第一罐混凝土(FCD),2017 年投入运行。

中广核集团在二十多年引进、消化、吸收国际压水堆核电技术的基础上实现自主创新的重要成果“ACPR1000+技术方案”,“ACPR1000+技术方案”总体水平达到了三代核电技术水平,可以作为我国后续核电发展的技术选择之一,为我国核电“走出去”战略提供了有效技

术支撑。

目前,超临界水堆以其经济性和高热效率得到了国内外科研机构的青睐。非能动技术的固有安全性特征也在四代堆中得以体现。国内外不少学者开展了超临界水自然循环方面的研究工作。中国核动力研究设计院总体及各相关设计专业,在大量分析论证的基础上,结合热工水力试验研究和材料研究的成果,提出了具有自主知识产权的超临界水冷堆(SCWR)设计方案——中国超临界水冷堆(CSR1000),完成了初步的可行性分析。

(2) 程序研制

针对先进压水堆非能动安全系统的特点,中国核动力设计院 NPIC 开发出了一些专用分析计算程序。针对先进堆安全壳非能动传热特点, NPIC 研制出了二维和三维的安全壳热工水力分析程序 PCCSAC。针对非能动余热排出系统,研制了专用的设计分析程序 SGSPRHR 和 MISAP,并用试验数据对其进行了验证。国家核电自成立以来就致力于程序的研发,特别是对 AP1000 中技术进行了计算程序的研发,取得了一定的进展。西安交通大学也自己开发了压水堆程序。华北电力大学周涛教授负责的核热工安全与标准化研究所,开发了一系列非能动程序及软件,如“超临界水堆物理热工耦合瞬态安全分析程序”及“铅铋热工水力分析程序软件”等。

1.3 非能动技术的特征

1.3.1 非能动技术的内涵特征

1. 非能动技术的功能特性

非能动部件为不依靠触发、机械运动或动力源等外部输入而行使功能的部件,其一般是利用自然对流、压力、重力等物理定律来实现相关功能的。

在功能上,非能动系统体现了可靠性、简洁性和自动性。可靠性是一个时间相对性概念,说明系统在一定时间尺度上具有的可用性和故障率;简洁性是一个空间相对性概念,说明系统空间尺度的大小和零部件的多少;自动性是系统在事故工况下具有一定的自身修复功能。在本质上,所有非能动系统都具有自能源特性,即系统功能所需能量来自系统本身。自能源特性也是一个空间相对性概念,即在指定空间尺度范围内的能量可视为系统内部能量。

理想化的非能动系统具有以下特点:①沟通性:可以向控制上级准确提供所需系统或现场参数,可以无误接收上级控制命令;②全知性:可以准确得到所有系统或现场参数;③独断性:根据系统及现场参数可独立下达内部指令,使系统自动实现设计功能;④自立性:系统工作所需能源可完全自给;⑤高效性:系统执行机构可依靠本身有限能源,确保设计功能的实现;⑥永固性:系统的整体结构、所有数据电路及能量传输通路具有绝对的可靠性。理想化的非能动系统是通过子系统功能理想化取得的,所有工程上应用的系统都不可能达到这个理想化的目标。

2. 非能动技术的时空相对性

非能动概念从表象到本质均具有时空相对性,正是这种相对性决定了能动与非能动概念的对立统一,导致了关于非能动系统判定标准的争论。非能动概念并不是绝对的,依据

不同的判定标准,结论可能完全相反。以 AP1000 的关键技术之一 ADS-4 爆破阀为例,如果以大尺度衡量,将 ADS-4 阀门当成整体看待,阀门动作的能量来自于本身,ADS-4 爆破阀显然是非能动的;但是,如果不认为 ADS-4 爆破阀爆破装置是阀门的一部分,则 ADS-4 也是一个需要爆破能量输入的阀门,此阀门应该是一个能动的设备。同理,甚至可以在大尺度上认为一座稳定运行的核电厂是非能动的;而缩小尺度,判定预压气体的辅助设备(ACC)为能动系统。

1.3.2 非能动技术的外延特征

1. 非能动技术与安全性问题

非能动技术在核能、太阳能及其他能源中的利用减少了这些系统中能动部件的应用。部件的减少就意味着失效概率的降低,从而保证了系统的安全性。但是非能动技术在保证系统安全性方面,不仅仅是靠部件减少来提高安全性。

AP1000 就采用了非能动的安全技术来预防和缓解严重的核电事故。这其中包括非能动堆芯冷却系统、非能动安全壳系统、非能动安全壳裂变产物去除系统和非能动主控制可居留系统。非能动堆芯冷却系统包括非能动余热去除系统和安全注入系统,其中非能动余热去除系统引入了一个非能动热交换器,在冷却剂泵失效时,通过自然对流循环,将堆芯余热传到该热交换器,后者将热量带到安全壳内的换料水箱,换料水箱中的水达到饱和后蒸发至安全壳内,最终通过非能动安全壳冷却系统将热量排往大气,整个传热过程不需要外在动力;安全注入系统则是依靠重力和气体的储能将硼水注入反应堆,导出余热并降低其反应性。非能动安全壳系统在事故时依靠钢制安全壳外壁气流通道的空气自然对流和冷却水蒸发,带走安全壳内的热量,防止安全壳内超温、超压,以保证安全壳的完整性。在发生堆芯熔化时,堆腔淹没系统将水注入堆内的同时,也注入压力容器外壁与堆坑绝热层之间的空间,以冷却从堆芯落到压力容器下封头的堆芯熔融物,保证下封头不被熔穿,使熔融物保持在反应堆压力容器内,避免堆芯熔融物与安全壳混凝土底板发生发热反应,防止安全壳底板直接受热破损和蒸汽爆炸的发生。

2. 非能动技术与经济性问题

太阳能厂房的应用及太阳能系统中自然循环技术的利用,在很大程度上节约了不可再生能源,同时减少了动力设备的应用。设备的减少正是经济性的一种体现。

在核电方面,确保核电安全有 4 要素,包括自然的安全性、非能动的安全性、能动的安全性和后备的安全性。其中,自然的安全性、非能动的安全性及后备的安全性分别依靠自然科学法则以及建立在自然科学法则基础上的非能动设备的安全性或冗余特性来实现,不需要能动设备提供能量,必然节能。安全是通过节能来实现,节能是安全的途径。发展核电,要把握节能是安全的途径,实现核电安全要始终坚持节能,最安全可靠的就是节能的。此外,在当前市场经济的大环境下,核电的发展要考虑成本高低,实现中国核电的长期发展,必须始终坚持节能原则。

AP1000 采用非能动安全系统,是当今世界先进核电自主品牌的典型代表,在安全与节能两个方面都取得了较大突破(见图 1-1)。