

学校编码: 10384  
学号: 32420141152228

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

螺旋管式直流蒸汽发生器  
密度波不稳定性分析

Analysis of Density Wave Oscillations in Helically Coiled  
Tube Once-Through Steam Generator

郝俊伟

指导教师姓名: 李 宁 教授  
张尧立 助理教授  
郑剑香 高级工程师

专 业 名 称: 核工程与材料

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评 阅 人: \_\_\_\_\_

2017 年 5 月

螺旋管式直流蒸汽发生器密度波不稳定性分析

指导教师：李宁 教授、张尧立 助理教授、郑剑香 高级工程师

厦门大学

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

螺旋管式直流蒸汽发生器 (H-OTSG) 具有传热性能良好、布置紧凑、热膨胀自由等优势, 在先进小型模块化反应堆 (SMR) 以及其他工业换热设备中获得了广泛的应用。在特定的工况中, 螺旋管式直流蒸汽发生器可能发生流动不稳定性现象, 一旦发生, 将严重危及反应堆安全。为了确保反应堆的安全性, 必须对蒸汽发生器内的流动不稳定性现象进行分析, 避免流动不稳定性现象的产生。

目前的蒸汽发生器流动不稳定性程序大多针对直管或 U 型管, 缺少针对螺旋管开发的流动不稳定性分析工具。在这些程序的计算中, 往往考虑均匀热流边界条件, 而忽略了真实换热过程中出现的非均匀热流边界条件。为了更准确地研究螺旋管式蒸汽发生器的流动不稳定性问题, 需要针对螺旋管开发专门的流动不稳定性分析程序, 并使用程序研究螺旋管式直流蒸汽发生器的流动不稳定性问题。

本文在采用单变量线性频域法的直管分析程序 STEAMFREQ 的基础上进行了修正与改进, 增加了螺旋管分析模块, 修改了换热工质, 优化了计算方法, 使用 Fortran 语言开发了分析螺旋管直流蒸汽发生器内密度波不稳定性专用程序 STEAMFREQ-H, 并计算了 SMART 的稳态参数进行了对比验证。针对我国目前正在开发的小型模块堆中的螺旋管式直流蒸汽发生器, 使用该程序进行了稳态计算和流动不稳定性分析, 研究了各参数对于该螺旋管式直流蒸汽发生器流动不稳定性影响, 对影响流动不稳定性主要因素进行了分类整理, 并提出了缓解和消除密度波不稳定性方案。为了验证计算结果的准确性, 使用 RELAP5/MOD 3.2 对直流蒸汽发生器螺旋管进行建模和分析, 将 RELAP5/MOD 3.2 得到的时域分析结果与频域程序计算结果进行了对比验证。

**关键词:** 螺旋管; 直流蒸汽发生器; 热工水力计算; 两相流不稳定性; 密度波不稳定性

## Abstract

Helically coiled tube Once-Through Steam Generator (H-OTSG) is widely adopted in advanced small modular reactors (SMR) and other industrial heat exchange equipment for its compactness, enhanced heat transfer efficiency and capability of accommodating thermal expansion. Under certain working conditions, two phase flow instability that endangers safety of plants can occur in the secondary side of H-OTSG. To ensure safety of reactors, it is essential to analyze flow instability phenomenon in H-OTSG and avoid its occurrence.

The majority of current codes to investigate flow instabilities in steam generators focus on straight tubes or U-tubes. These codes are not applicable to H-OTSG. Uniform heat flux boundary is usually employed in the calculation of these codes and the non-uniform heat flux boundary of the real heat transfer process in steam generators tends to be ignored. To investigate flow instabilities in H-OTSG more precisely, code dedicated to analyze flow instabilities in helical tubes needs to be developed.

A special Fortran code to analyze density wave oscillations (DWO) in H-OTSG was developed based on STEAMFREQ which adopts single variable linear frequency domain methods to predict DWO in straight tubes. The mathematic models in the code, including the heat transfer and pressure drop models were modified for helical geometry. In the development process, modules to analyze helical geometry were added, the heat transfer medium was replaced and the calculation methods were optimized. The capability of STEAMFREQ-H on steady state calculation were verified by comparing to the design data of SMART. Steady state calculation and flow instability analysis were carried out with STEAMFREQ-H, focusing on a typical H-OTSG in SMR under development in China at the present. Parametric effects on DWO in the H-OTSG were analyzed based on different Nyquist curves, main influence factors of DWO were classified and solutions to eliminate DWO in the H-OTSG were proposed. To verify the results of STEAMFREQ-H, RELAP5/MOD

3.2 code was employed to simulate DWO phenomenon of H-OTSG in time domain. By comparing results of STEAMFREQ-H and RELAP5/MOD 3.2, the frequency domain code was verified and the capability of RELAP5/MOD 3.2 to simulate helical tube was evaluated.

**Keywords:** Helical tube; Once-through steam generator; Thermal hydraulics; Two-phase flow instability; Density wave oscillation.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 主要符号表

$d$	管道内径 (m)	希腊字母	
$d_o$	管道外径 (m)	$\alpha$	螺旋上升角 ( $^\circ$ )
$D$	螺旋直径 (m)	$\rho$	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$D_H$	水力直径 (m)	$\lambda$	热导率 ( $\text{W/m K}$ )
$De$	迪恩 (Dean) 数 (-)	$\sigma$	纵向相对间距, $\sigma = p / d_o$ , (-)
$f$	摩擦系数 (-)	$\mu$	动力粘度 ( $\text{Pa s}$ )
$f_c$	螺旋管摩擦系数 (-)	$\delta$	壁厚 (m)
$f_s$	直管摩擦系数 (-)	$\Delta$	壁面粗糙度 (-)
$G$	质量流速 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ )	$\Delta p$	压降 (Pa)
$h$	对流换热系数 ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$ )		
$L$	加热段长度 (m)		
$Nu$	努塞尔 (Nusselt) 数 (-)	下标	
$p$	螺旋管节距 (m)	$cr$	临界
$P$	系统压力 (Pa)	$f$	饱和液
$Pr$	普朗特 (Prandtl) 数(-)	$g$	饱和蒸汽
$q$	热流密度 ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )	$w$	在壁面温度下
$Re$	雷诺 (Reynolds) 数 (-)	$in$	入口
$u_o$	全液相速度 (m/s)	$ex$	出口
$u_m$	水平均流速 (m/s)	$N$	一次侧流体
$x$	质量含汽率 (-)	$W$	二次侧流体
$T$	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	$u$	未加热段
$A$	面积 ( $\text{m}^2$ )	$s$	过热段
$v$	比容 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	$r$	出口及上升段



# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
主要符号表 .....	IV
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 研究背景.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 螺旋管式直流蒸汽发生器的特点和应用 .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 螺旋管式直流蒸汽发生器的特点.....	2
1.2.2 先进小型模块堆介绍.....	3
<b>1.3 两相流不稳定性.....</b>	<b>6</b>
1.3.1 两相流不稳定性种类.....	6
1.3.2 密度波不稳定性.....	8
1.3.3 两相流不稳定性数值分析方法.....	10
<b>1.4 研究现状.....</b>	<b>12</b>
<b>1.5 论文内容和意义.....</b>	<b>13</b>
<b>1.6 论文结构.....</b>	<b>14</b>
<b>第二章 频域程序 STEAMFREQ-H 的开发 .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 计算流程.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 计算原理.....	16
2.1.2 程序流程.....	17
2.1.3 程序改进介绍.....	21
<b>2.2 数学模型.....</b>	<b>21</b>
2.2.1 未受热段.....	21
2.2.2 加热管壁.....	22
2.2.3 加热过冷段.....	23
2.2.4 两相沸腾段.....	26
2.2.5 过热蒸汽段.....	28
2.2.6 出口及上升段.....	28
<b>2.3 螺旋管模型和公式.....</b>	<b>29</b>
2.3.1 换热公式.....	29
2.3.2 压降公式.....	31
<b>2.4 稳定性分析原理.....</b>	<b>34</b>
2.4.1 单通道稳定性分析.....	34
2.4.2 回路稳定性分析.....	35
<b>2.5 程序验证计算.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6 本章小结.....</b>	<b>37</b>

<b>第三章 频域法计算及分析 .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 稳态分析.....</b>	<b>38</b>
3.1.1 稳态计算结果.....	39
3.1.2 温度分布.....	40
3.1.3 对流换热系数分布.....	40
3.1.4 热阻分布.....	41
3.1.5 含汽率变化.....	42
3.1.6 热流密度分布.....	43
<b>3.2 各参数对流动不稳定性影响.....</b>	<b>44</b>
3.2.1 入口节流.....	44
3.2.2 加热段长度.....	45
3.2.3 系统压力.....	46
3.2.4 入口过冷度.....	46
3.2.5 螺旋上升角.....	47
3.2.6 螺旋直径.....	48
3.2.7 螺旋管内径.....	48
3.2.8 螺旋管壁厚.....	48
<b>3.3 消除流动不稳定性主要措施.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 本章小结.....</b>	<b>50</b>
<b>第四章 时域法计算及分析 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 RELAP5 介绍 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 RELAP5 模型 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 RELAP5 计算结果 .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 不同入口节流系数的稳定情况.....	53
4.3.2 流动不稳定时通道内流体特性.....	53
<b>4.4 RELAP5 和 STEAMFREQ-H 对比.....</b>	<b>56</b>
<b>4.5 本章小结.....</b>	<b>58</b>
<b>第五章 总结与展望 .....</b>	<b>59</b>
5.1 论文工作总结.....	59
5.2 未来工作展望.....	60
<b>参考文献 .....</b>	<b>62</b>
<b>致谢.....</b>	<b>67</b>

## Contents

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>II</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>IV</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Research background</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Characteristics and applications of H-OTSG</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Characteristics of H-OTSG .....	2
1.2.2 Introduction of SMR .....	3
<b>1.3 Two phase flow instability</b> .....	<b>6</b>
1.3.1 Types of two phase flow instabilities .....	6
1.3.2 Density wave oscillations .....	8
1.3.3 Numerical analysis methods of two phase flow instabilities .....	10
<b>1.4 Research status</b> .....	<b>12</b>
<b>1.5 Research scope and significance</b> .....	<b>13</b>
<b>1.6 Structure of the thesis</b> .....	<b>14</b>
<b>Chapter 2 The development of STEAMFREQ-H</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Calculation process</b> .....	<b>16</b>
2.1.1 Calculation principle .....	16
2.1.2 Flow chart of the code.....	17
2.1.3 Introduction of the modification .....	21
<b>2.2 Mathematical models</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Unheated subcooled region .....	21
2.2.2 Heated tube wall region .....	22
2.2.3 Heated subcooled region .....	23
2.2.4 Boiling region .....	26
2.2.5 Superheated region.....	28
2.2.6 Outlet resistance and riser .....	28
<b>2.3 Models and Correlations</b> .....	<b>29</b>
2.3.1 Heat transfer correlations .....	29
2.3.2 Pressure drop correlations .....	31
<b>2.4 Theory of stability analysis</b> .....	<b>34</b>
2.4.1 Stability analysis of single channel .....	34
2.4.2 Stability analysis of the loop .....	35
<b>2.5 The steady state verification of the code</b> .....	<b>36</b>
<b>2.6 Chapter summary</b> .....	<b>37</b>

<b>Chapter 3 Calculation and analysis in frequency domain.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Steady-state analysis .....</b>	<b>38</b>
3.1.1 Steady-state calculation results .....	39
3.1.2 Temperature distribution .....	40
3.1.3 Convective heat transfer coefficient distribution .....	40
3.1.4 Heat resistance distribution.....	41
3.1.5 Steam quality distribution .....	42
3.1.6 Heat flux distribution .....	43
<b>3.2 Parametric effects on DWO .....</b>	<b>44</b>
3.2.1 Inlet throttling .....	44
3.2.2 heated length .....	45
3.2.3 System pressure .....	46
3.2.4 Inlet subcooling degree .....	46
3.2.5 Helix angle .....	47
3.2.6 Helix diameter.....	48
3.2.7 Tube inner diameter .....	48
3.2.8 Wall thickness .....	48
<b>3.3 Solutions to eliminate DWO.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Chapter summary .....</b>	<b>50</b>
<b>Chapter 4 Calculation and analysis in time domain .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Introduction of RELAP5 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 Models of RELAP5 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 Results of RELAP5 .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 System stability with different inlet throttlings .....	53
4.3.2 Transient behaviours of flow instabilities .....	53
<b>4.4 Comparison of RELAP5 and STEAMFREQ-H .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5 Chapter summary .....</b>	<b>58</b>
<b>Chapter 5 Summary and Prospect.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1 Summary of the thesis .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2 Work prospects.....</b>	<b>60</b>
<b>Reference .....</b>	<b>62</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>67</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

减少温室气体的排放是缓解全球气候变化的重要途径。当前，世界出现了能源变革和低碳发展的潮流，节能减排和能源结构低碳化已成为大国能源战略的共同选择。核电作为一种清洁高效的能源，是能增加能源供应、优化能源结构、应对气候变化、减少温室气体排放、实现低碳发展的重要技术<sup>[1]</sup>。

目前我国核电占比低，潜力大。根据我国 2016 年核电运行情况报告<sup>[2]</sup>，截至 2016 年 12 月 31 日，我国已投入商业运行的核电机组共 35 台，运行装机容量为 3363 万千瓦，占全国电力装机约 2.04%。核电发电量约占全国总发电量的 3.56%，远低于当前全球核电占比 10.7% 的平均水平<sup>[3]</sup>。发展核电对我国突破资源环境的瓶颈制约，实现绿色低碳发展具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。根据我国电力发展“十三五”规划，十三五期间，全国核电投产约 3000 万千瓦、开工 3000 万千瓦以上，预计 2020 年装机将达到 5800 万千瓦，在建 3000 万千瓦<sup>[5]</sup>。我国核电面临良好的发展前景，核电将成为我国未来可持续能源体系的重要支柱之一。

核安全问题是整个核电行业的重中之重，日本福岛核事故发生后，核安全问题进入全球各国政府与民众的视野，引发了国际社会对核安全问题的重新评估与反思。我国核安全局实施了福岛核事故改进行动，而且在核安全规划上提出应从设计上消除大规模放射性释放，从根本上保障核电的安全，消除核事故对环境和公众的危害。

蒸汽发生器是压水堆核电站的主要部件之一，是反应堆一回路和二回路热量传递的枢纽，也是隔绝放射性的重要屏障，对反应堆的运行和安全起着至关重要的作用。蒸汽发生器中的工作原理是，一回路冷却剂吸收堆芯产生的热量，通过蒸汽发生器的传热管，将二回路的液相水加热成为具有一定压力、温度的过热蒸汽，推动汽轮机做功。蒸汽发生器能够安全地运行，对于整个反应堆的安全性十分重要，各国都把研究和改进蒸汽发生器作为完善核电厂技术的关键。

蒸汽发生器二次侧存在气液相变，在一定的条件下会产生两相流动不稳定性现象。两相流动不稳定性是指在两相流动系统中发生的流量振荡和漂移现象。密

度波不稳定性是工业系统最常见的两相流不稳定性之一。密度波不稳定性会使传热管流量、压降和截面含气率大幅振荡。这种持续振荡会引起机械部件的振动，导致设备疲劳损坏，干扰控制系统的正常运行，影响局部传热性能，产生沸腾危机，还会造成壁面温度周期性变化，从而引起热应力疲劳破坏等问题。如果蒸汽发生器无法正常工作，堆芯产生的大量热量也就无法传递出去，还会使堆芯过热导致熔化，引发更严重的事故。研究流动不稳定性现象的发生机理，分析蒸汽发生器的流动不稳定性状况，预测不稳定性产生的条件，比较各种因素对系统稳定性的影响，确定蒸汽发生器的安全工作区域，采取有效措施避免产生流动不稳定性现象，保证反应堆的安全运行，在蒸汽发生器及相关设备的设计制造、控制以及反应堆运行中，具有十分重要的意义。

## 1.2 螺旋管式直流蒸汽发生器的特点和应用

### 1.2.1 螺旋管式直流蒸汽发生器的特点

目前反应堆中的蒸汽发生器各式各样，可以从不同角度进行分类。按载热剂的性质可分为水-水型、气-水型、液态金属-水型等。按循环方式分类可分为自然循环和强制循环两种，强制循环即直流式。按外形分类可分为卧式、立式和半卧式等。按传热管结构分类可分为直管、U型管、螺旋管等。不同类型的蒸汽发生器有着自己的特点，本文研究的对象是我国正在研发的水-水型立式螺旋管直流蒸汽发生器，这种类型的蒸汽发生器广泛应用于小型模块化反应堆中。

螺旋管式直流蒸汽发生器是一种管壳式热交换器，传热部分由螺旋管缠绕组成，二次侧给水在螺旋管束内吸收一次侧的热量，成为过热蒸汽。相比于其它类型的蒸汽发生器，螺旋管式直流蒸汽发生器应用于小型模块堆中具有明显的优势：

- (1) 尺寸小，结构紧凑，功率密度高，单位体积换热能力更强。
- (2) 由于螺旋管内离心力的作用，管内流动工质存在漩涡流动，对边界层产生扰动，使其传热性能优于直管。
- (3) 螺旋盘管具有自补偿特性，热膨胀自由，能避免产生过大的温度应力。提高了设备的安全性和可靠性。

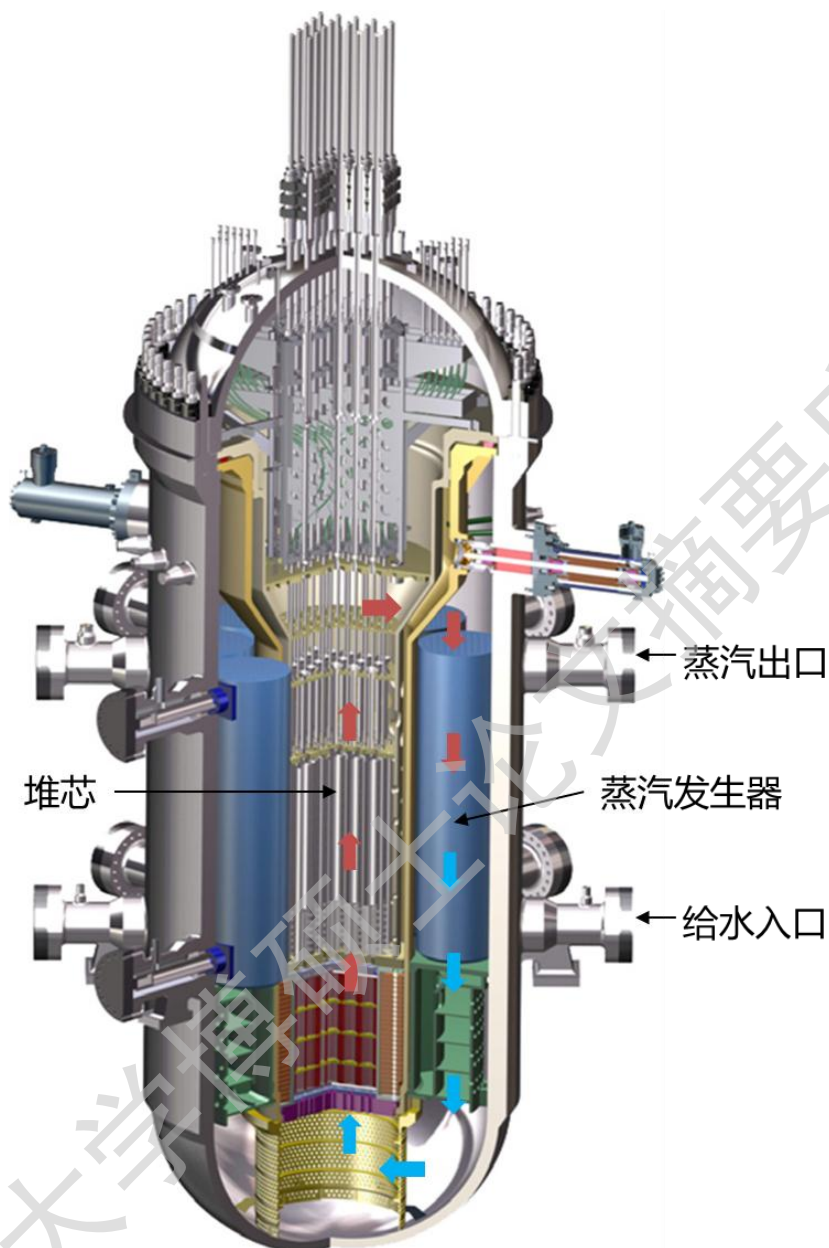
- (4) 蒸汽发生器管外工质在螺旋管束间横向冲刷，换热性能更好。
- (5) 直流螺旋管束在结构上有利于实现一体化和模块化。
- (6) 直流蒸汽发生器产生的是过热蒸汽，不需要使用汽水分离器，简化了系统，并提升了蒸汽品质。

### 1.2.2 先进小型模块堆介绍

小型模块化反应堆是当前核能领域研究的热点之一。由于其在安全特性方面具有非常显著的优势，并适用于多种场合，因而备受关注。在安全性方面，小型模块堆通过加强固有安全性设计并引入非能动安全设施，以此强化反应堆的安全性。在多功能性方面，小型模块堆不仅可成为传统化石燃料电站的替代选择，同时也可以在海水淡化、工业制氢、工业供气、城市供暖等领域发挥作用<sup>[6]</sup>。

由于螺旋管式直流蒸汽发生器传热性能良好、布置紧凑、热膨胀自由等优势，在小型模块堆中得到了广泛的应用。韩国的 SMART，美国的 IRIS、NuScale 以及俄罗斯的 VBER-300 和 KLT40S 等都采用了螺旋管式直流蒸汽发生器作为小型模块堆的换热装置<sup>[7]</sup>。

SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor) 是韩国设计的一体化小型模块堆。SMART 的反应堆冷却剂系统采用了一体化的布置方式，包括 8 台螺旋管式直流蒸汽发生器，4 台屏蔽电机泵和自控式稳压器。图 1.1 为 SMART 压力容器示意图，堆芯和压力容器壁中间布置的蓝色圆筒状结构为螺旋管式直流蒸汽发生器模块，一个模块内有 323 根螺旋管。一次侧高温水在电机泵的驱动下从蒸汽发生器上方孔板流入套筒，冲刷螺旋管束换热，然后从套筒下方流出，经过压力容器下腔室后流入堆芯加热，如此循环。二次侧过冷水从套筒下方给水管流入螺旋管，在螺旋管内自下向上流动，吸收一次侧的热量产生过热蒸汽，经套筒上方蒸汽集管流出。

图 1.1 SMART 压力容器示意图<sup>[8]</sup>

IRIS (International Reactor Innovative and Secure) 是由美国能源部领导多国共同设计研发的新型反应堆，功率为 335MWe。IRIS 的设计以成熟的压水堆技术为基础，充分利用了 AP600 压水堆和其它先进压水堆的设计成果。图 1.2 为 IRIS 的压力容器示意图。IRIS 的反应堆冷却剂系统采用了一体化布置，事故工况下使用自然循环进行冷却。采用螺旋管式直流蒸汽发生器，一次侧工质在螺旋管外自上向下流动，二次侧工质在螺旋管内向上流动。8 个蒸汽发生器模块布置在堆芯围板外侧和压力容器内侧之间的环状腔体中，每个蒸汽发生器中有 656 根螺旋传热管<sup>[9-11]</sup>。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库