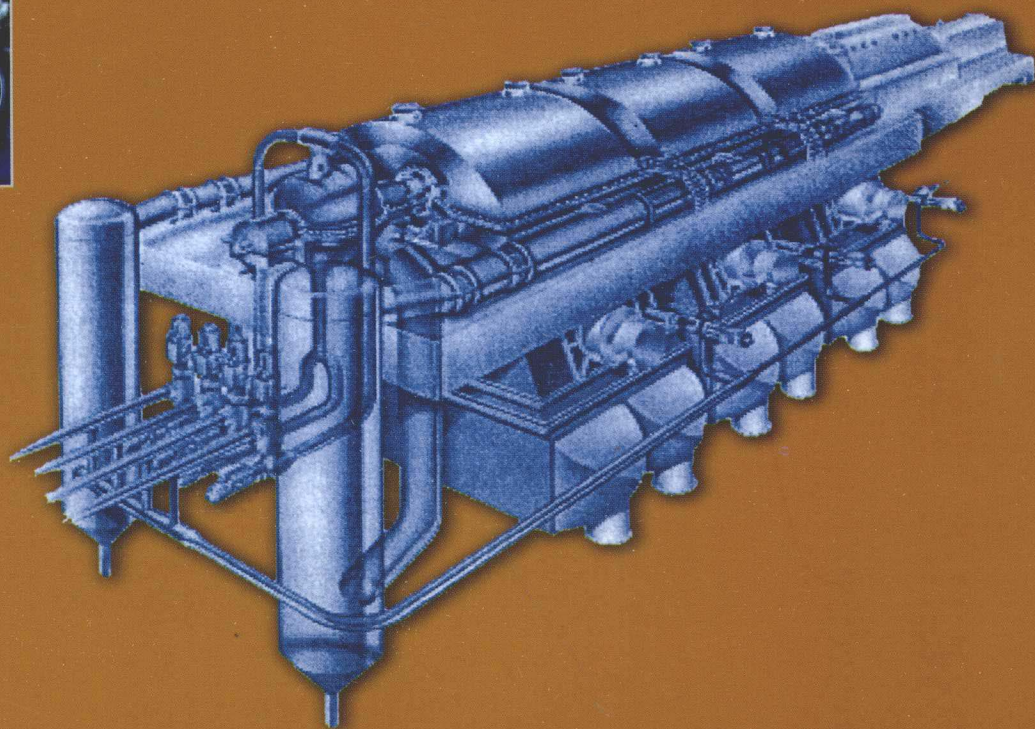
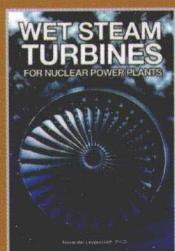


Alexander Leyzerovich

核电湿蒸汽汽轮机

Wet-Steam Turbines for Nuclear Power Plants

〔俄〕 亚历山大·雷泽洛维奇 著
谢永慧 张 荻 译
俞茂铮 审校



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

Wet-Steam Turbines for Nuclear Power Plants

核电湿蒸汽汽轮机

[俄] 亚历山大·雷泽洛维奇 著
(Alexander Leyzerovich)

谢永慧 张 荻 译
俞茂铮 审 校



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

Wet-Steam Turbines for Nuclear Power Plants by Alexander Leyzerovich
Copyright©2005 by PennWell Corporation

Chinese Translation Copyright©2013 by Xi'an Jiaotong University Press.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without written permission from the publisher.

本书中文简体字版由美国 PennWell 公司授权西安交通大学出版社在中国境内出版发行, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

陕西省版权局著作权合同登记号 图字 25 - 2013 - 053 号

图书在版编目(CIP)数据

核电湿蒸汽汽轮机/(俄)雷泽洛维奇(Leyzerovich, A.)著;
谢永慧, 张获译; 俞茂铮审校. —西安: 西安交通大学出版社,
2013. 12

书名原文: Wet-Steam Turbines for Nuclear Power Plants
ISBN 978 - 7 - 5605 - 5280 - 4

I. ①核… II. ①雷… ②谢… ③张… ④俞… III. 核能-
湿蒸汽-原子能汽轮机 IV. ①TK26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 107469 号

书 名	核电湿蒸汽汽轮机
著 者	(俄) 亚历山大·雷泽洛维奇(Alexander Leyzerovich)
译 者	谢永慧 张 获
审 校 者	俞茂铮

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://ligong.xjtupress.com>

电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82669097

印 刷 陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本	787mm×1 092mm	1/16	印张	20.375	字数	460 千字
版次印次	2013 年 12 月第 1 版	2013 年 12 月第 1 次印刷				
书 号	ISBN 978 - 7 - 5605 - 5280 - 4/TK · 108					
定 价	55.00 元					



读者购书、书店添货、如发现印装质量问题, 请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者序

人类文明的发展史也是人类开发能源和利用能源的进化史。上世纪 40 年代人类第一次利用原子核裂变能量制造出原子弹,从上世纪 50 年代起,人类开始和平利用核能,核能发电是最为重要的方式。自 1951 年 12 月美国实验增殖堆 1 号 (EBR-1) 首次利用核能发电以来,世界核电至今已有 60 余年的发展历史。虽然在核电的发展过程中出现了如 1979 年美国三哩岛、1986 年前苏联切尔诺贝利和 2011 年日本福岛等核电站事故,但是相比燃煤电站、燃气蒸汽联合循环、风能及太阳能等发电方式,核电能量密度高、高效稳定、发电成本低,具有不可替代的优点,在保证安全性的条件下,它是更为清洁和环境友好的能源。到目前为止核能发电量已占世界发电总量的 16%,是世界能源的重要组成部分。

我国核电坚持自主创新和引进消化吸收的发展战略,尤其近年来引进先进的第三代核电 AP1000 技术,大大提高了核电的安全可靠性。截至 2013 年 7 月,中国大陆共有运行和在建机组 46 台,其中在建核电机组 29 台,位居世界第一。根据核电中长期发展规划,到 2020 年,中国大陆核电装机容量将达到 5800 万 kW,在建核电将达到 3000 万 kW,今后每年新开工核电机组将保持在 4~6 台,核电事业将进入体系化、规模化的发展阶段。

蒸汽轮机是把反应堆产生的蒸汽转化为机械能的重要设备。目前世界上核电站使用的蒸汽轮机最大功率已达到 1700 MW,我国也已经研发了具有世界一流水平的大功率核电汽轮机,但与世界发达国家相比,在核电蒸汽轮机设计和制造方面仍然存在差距。国内外相关研究成果虽然很丰富,但大型蒸汽轮机属于制造厂的技术机密,即使有公开发表的研究成果也分布在大量文献中,研究人员难以收集与综合分析,因而缺乏系统介绍核电站蒸汽轮机方面的专著和教材。本书作者长期从事燃煤电站和核电站蒸汽轮机方面的研究,对于世界核电站蒸汽轮机的现状、技术特点以及进一步整修的措施具有深入的认识,并在书中进行了详细的阐述。

本书可以作为核动力工程、能源与动力工程、舰船等专业的本科生教学参考书,也可以作为相关专业研究生的教科书,供相关专业工程技术人员和研究人员参考。译者有幸将此书译成中文并推荐给读者,期望该书能促进我国核电事业的技术进步和发展。

本书共5章,其中第2章和第3章由谢永慧译,第1、4和5章由张荻译,全书最后由谢永慧统稿,并且请俞茂铮先生对全书进行了审校。俞茂铮先生以古稀之年,仍精神矍铄,笔耕不辍,提供了大量宝贵的修改意见,在此表示真诚感谢!此外还要感谢西安交通大学出版社贺峰涛副编审对本书出版的支持。

由于译者水平所限,译书中的缺点和错误难免,欢迎读者批评指正。

谢永慧、张荻

2013年9月于西安交通大学

序 言

彭韦尔(PennWell)公司在1997年出版了我的两卷本著作《大功率蒸汽轮机：设计和运行》(*Large Power Steam Turbines: Design & Operation*)。这部书以20世纪末世界工业发达国家的动力工业中相关经验为基础,对大功率汽轮机的主要设计技术和运行问题进行了综述。这些国家包括美国、前苏联、日本、德国、法国、英国、丹麦、捷克斯洛伐克及其他一些国家。该书是过去四十年中第一部关于汽轮机基本原理的英文专著,同时也是唯一包括大功率汽轮机设计和运行的现代专著。

本书与上文提及的专著不同之处在于,本书并不致力于向读者阐明汽轮机应如何设计,而是着重解释为什么要设计这些汽轮机以及它们是什么样子的。本书主要面对电厂和发电行业的工程师、大学教授及将来会在发电领域工作的学生。其目的是帮助他们理解可能影响汽轮机运行效率、可靠性及适应性的不同因素,同时也指出了改进上述汽轮机性能的主要设计方法。此外,本书还期望能够帮助读者充分理解当代汽轮机的概念以及现代透平机械的发展趋势。本书的第二部分阐述了电厂汽轮机的运行,给出了汽轮机运行及影响汽轮机性能主要因素的一般特征,描述了电厂运行过程中可能出现的常见损伤和失效形式,提供了解决这些问题的方法,并详述了在汽轮机运行环境下经周密考虑的试验研究。其中,汽轮机的瞬态运行(启动、停机以及在可控范围内的负荷变动)和改进方法、自动控制、检测及运行人员所需信息尤为重要。本书第三部分在不同国家大功率汽轮机的运行实例、美国核电厂最大的(1 300 MW)超临界机组以及世界范围内最先进的高参数超超临界现代汽轮机设计和运行经验的基础上,讨论并阐释了前两部分所描述的概念。

在接下来的两年中,又有两部著作对汽轮机通流部分的损伤及现状进行了综述并且提供了修复损伤的相关知识:《汽轮机通流部分损伤:理论与实践》(*Turbine Steam Path Damage: Theory & Practice*, 作者:T. H. McCloskey, R. B.

Dooley 和 W. P. McNaughton, EPRI 出版, 1999), 和《汽轮机通流部分: 维护和修理》(*Turbine Steam Path: Maintenance & Repair*, 作者: W. P. Sanders, PennWell 公司出版, 2001)。这两部著作主要面对电厂维修人员和具有不同背景的动力工程专家。此外, 还有一部专门概述动力工业中透平机械发展(直至 20 世纪末)的著作是《电厂发展 100 年: 作为原动机的蒸汽轮机和燃气轮机》(*100 Years of Power Plant Development Focus on Steam and Gas Turbines as Prime Movers*, 作者: H. Termuehlen, ASME 出版, 2001)。

尽管上述著作期望覆盖所有化石燃料电厂汽轮机和核电厂汽轮机, 但其主要研究对象仍为化石燃料电厂汽轮机。从某种程度上来说, 这是由于 1979 年三哩岛(Three Mile Island)核电厂 2 号机组发生事故, 特别是 1986 年 4 月切尔诺贝利(Chernobyl)核电厂灾难后, 核电工业面临了一些特有的问题。不过目前的核电工业正处于复兴时期, 这引起了美国及其他国家电厂所有者和运营者的极大兴趣。

首先, 近年来整个世界的核电厂均呈现出了非常良好的运行状况, 电厂的安全性、可用性和效率大幅提升。K. Davis 在 2001 年 6 月的 *Electric Light & Power* 上发表的一篇论文中写到: “美国核能学会(American Nuclear Society)强调, 核能工业所保持的安全记录比全美其他工业部门的安全记录好近十倍”。尽管现役核电厂已具有很好的经济性能, 但新的、经过升级改造的机组将更具经济竞争力。普遍认为, 新设计的先进核反应堆将会更加安全可靠, 尤其是将其应用于传统且广泛使用的轻水堆(压水反应堆 PWR 和沸水反应堆 BWR)及加压重水堆(PHWR 和 CANDU)机组(上述机组均采用湿蒸汽汽轮机)。

随着即将来临且不可避免的天然气及石油日益耗尽, 在可预见的将来, 只有核电工业能够满足动力设备对能源大规模需求的增长。对许多发达国家(包括美国)来说, 核电似乎是唯一使其脱离对天然气和石油进口的依赖, 并为其提供备用资源的可行方法。当然, 提高核电厂容量的同时也将建设新的燃煤电站。但是, 大规模、密集的煤炭燃烧量将会与电厂要求减少由一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)和氮氧化合物(NO_x)排放导致的空气污染相冲突。核能发电几乎是零排放。燃煤电厂所有减少排放的措施都将极大增加发电费用。而核能发电成本已经比化石燃料电厂的成本低(包括燃煤电厂), 更不用说新能源了。

在配备了现代动力装置(包括先进反应堆)的新核电厂运行的同时, 旧核电厂

业主考虑到经济因素,也对许多服役期限到期的核电机组(包括汽轮机)设备进行了整修以重新获得运行许可证。上述整修除了能够提升机组运行的安全可靠性和延长电厂寿命,还将显著提高机组的运行效率。对汽轮机进行整修后,在反应堆蒸汽流量不变的情况下,核电机组输出的电功率可增加5%(即对于1 000 MW机组,输出功率可以增加50 MW)。

绝大多数核电厂湿蒸汽汽轮机采用压力相对较低的饱和蒸汽(大约6~7 MPa或更低)。这一参数比当代化石燃料电厂过热蒸汽汽轮机低得多,所以当电力输出相同时,湿蒸汽汽轮机需要更大的蒸汽流量。湿蒸汽汽轮机的输出功率有很大一部分是低压缸提供的。初始蒸汽参数低就意味着末几级中蒸汽水分含量很大,这可能导致通流部分的较大损伤,同时伴随大量能量损失。正因为如此,需要采用特殊方法对流道进行除湿。大多数汽轮机还额外添加(配备)了外部汽水分离再热器(MSR),该再热器可配置于高压缸之后、低压缸之前,或者配置在单独的中压部分。尽管采取了这些措施,但全部高压缸和大部分低压汽轮机级仍然运行在湿度较高的环境中(湿度高达12%~14%)。上述因素决定了湿蒸汽汽轮机的设计和运行特点。尤其是所有的核电湿蒸汽汽轮机均设计为单轴或者单轴多缸(tandem-compound)形式,其显著特点(包括最大的汽轮机)为低转速(50 Hz电网,汽轮机转速为1 500 rpm;60 Hz电网,汽轮机转速为1 800 rpm),而大功率化石燃料过热蒸汽汽轮机则通常设计为双轴或并列双轴(cross-compound)形式。

由于核电工业正在经历新的复兴时期,我觉得有必要写一本新书来特别说明核电厂中的湿蒸汽汽轮机,详细描述其设计、运行和整修中的特点。这本新书是上述几本书的延续,并没有过多重复那些对于过热蒸汽汽轮机和湿蒸汽汽轮机都通用的基本概念。

我希望读者能够通过阅读本书,对当代大型核电厂中广泛应用的现代大功率汽轮机及其未来发展、设计和运行特征、主要的运行问题以及解决这些问题的方法有一个清晰的了解。书中还给出了世界主要湿蒸汽汽轮机制造企业(阿尔斯通公司、通用电气公司、日立公司、列宁格勒金属工厂、三菱重工、西门子发电集团、斯柯达、东芝公司和Turboatom)采用不同设计方案改进老旧汽轮机运行性能的实例。本书还力图使读者了解湿蒸汽汽轮机运行过程中的一些物理现象,包括这些现象对汽轮机运行性能的影响,以及考虑相关现象来改进电厂运行性能的方法。

另一方面,本书并不深入探讨湿蒸汽动力学和计算流体动力学、材料的选择、强度评估以及其他对汽轮机设计者和研究者非常重要的细节。而是把更多的注意力集中在湿蒸汽汽轮机的运行特点上,并为操作人员提供支撑信息。这是本书与其他相关著作的不同之处。

20 世纪 70 和 80 年代后期,三哩岛及切尔诺贝利事故之前是核电工业发展的第一阶段,出现了一些很有价值且非常专业的核电厂汽轮机专著,其中包括一些俄语专著,如:《核电厂中的汽轮机》(*Steam-Turbine Installations for Nuclear Power Plants*, Y. F. Kosyak, 1978);《核电厂汽轮机》(*Turbines for Nuclear Power Plants*, B. M. Troyanovsky, 第 2 版, 1978);《核电厂中汽轮机的运行》(*Operation of Turbines at Nuclear Power Plants*, Y. F. Kosyak, V. N. Galatsan, V. A. Paley, 1983);《核电厂中的蒸汽轮机和燃气轮机》(*Steam and Gas Turbines for Nuclear Power Plants*, B. M. Troyanovsky, G. A. Fillipov, A. E. Bulkin, 1985);《核电厂汽轮机的运行条件》(*Operating Conditions of Turbo-sets for Nuclear Power Plants*, B. A. Arkad'ev, 1986);《热动力装置中的两相流动》(*Two-Phase Flows in Elements of Thermal Power Equipment*, M. E. Deich, G. A. Fillipov, 1987)。这些专著都写得非常好,但考虑到美国和许多其他国家的专业人员从未阅读过它们,因此本书尽可能多地采用了上述著作中的一些内容。

与此同时出版的一本非常有名的专著《汽轮机和分离器中的两相蒸汽流》(*Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators*, 1976)则成为了所有湿蒸汽汽轮机研究人员的手册。其作者是 M. J. Moore 和 C. H. Sieverding, 并且有最好的美国、德国、英国和瑞典专家参与写作,包括西屋公司的 R. L. Coit, KWU 的 W. Engelke, Brown Boveri 公司的 G. Gyarmathy 和 C. A. Parsons 的 A. Smith。

上述所有著作都是由主要从事湿蒸汽汽轮机设计和开发,并研究相关问题的科学家和工程师撰写的。这些书籍阐述了专家们积累的一般性经验,主要适于同一领域的专家参考。甚至当作者撰写汽轮机运行时,也仿佛是从外行的观点来分析新问题,给人的感觉是从另一个角度看待同一个问题。此外,这些书都有些过时,并未覆盖最近的发展趋势以及透平机械和电力工业的发展成果。本书将主要从汽轮机运行人员而不是设计人员的角度给出这些书中最好的信息,同时对上述

著作的内容进行综述、更新及补充。因此,很多对于设计人员和研究人员来说非常典型及重要的问题,对于电厂工程师就只需要大概了解,本书中将只作简单提及或者直接忽略。本书还包含了大量的参考文献和书目,可以为读者查找详细资料提供方便。

本书尽可能参考了过去十年在美国、欧洲、俄罗斯和日本的电力工程期刊以及国际发电会议上发表的与湿蒸汽汽轮机和核电厂相关的多种论文资料。除了其他作者出版的资料,本书还包括了作者自己在湿蒸汽汽轮机方面的试验和计算研究成果,并且描述了作者在不同核电厂完成并实施的研发工作。作为首席专家,作者曾在莫斯科的俄罗斯热能工程研究所(VTI)工作超过30年,从1971年开始作者就深入开展了核电厂的实验和计算研究并完成了几个具体项目,直到发生切尔诺贝利灾难。作者的主要研究领域包括湿蒸汽汽轮机的瞬态运行状况、自动运行控制、检测和诊断,同时还为电厂工作人员提供各种信息。作者参与了单机容量为220 MW、500 MW和1 000 MW湿蒸汽汽轮机的现场测试,进行了自动控制及监测特殊设备和系统的概念化开发,并且参与了具体实施。作者还参与了不同核电厂湿蒸汽汽轮机的检测。这些研究工作的成果已在作者以前出版的著作(俄文版)中发表,包括《电力机组中汽轮机的启动》(合著者E. R. Plotkin,1980;1985年翻译为中文)、《发电汽轮机自动启动的技术基础》(1985),以及使用俄语和英语在不同动力工程期刊上发表的很多论文。

万分感谢E. R. Plotkin,N. S. Tchernetsky,V. B. Kirillov,A. D. Melamed,N. A. Rusanova,E. N. Sergievskaya,V. A. Panfilov,N. I. Davydov,B. N. Lyudomirsky和其他作者俄罗斯热能工程研究所的合作者们,以及这些年来在汽轮机制造业及核电厂中与作者共同工作、密切合作的同事们。此外,作者还要对来自不同国家帮助我为这部著作收集大量相关资料的同事们表示深深的感谢。

亚历山大·雷泽洛维奇博士

目 录

第 1 章 世纪之交的核电工业	(1)
1.1 核电湿蒸汽汽轮机的早期历史	(1)
1.2 核电工业运行业绩	(3)
1.3 用于电力生产的反应堆的主要类型	(15)
1.4 基于湿蒸汽汽轮机的核电厂近期展望	(20)
参考文献	(22)
参考书目	(25)
第 2 章 湿蒸汽汽轮机中的热力过程	(29)
2.1 初始、汽缸间及终端蒸汽参数	(29)
2.2 汽轮机流通部分的湿蒸汽流动特征	(37)
2.2.1 汽轮机叶片排中的湿蒸汽流动	(38)
2.2.2 湿度对湿蒸汽汽轮机效率的影响	(43)
2.2.3 汽轮机中湿蒸汽流动的实验研究	(50)
参考文献	(64)
参考书目	(67)
第 3 章 设计	(73)
3.1 湿蒸汽汽轮机的基本设计特点	(75)
3.1.1 单机功率和转速对汽轮机设计的影响	(75)
3.1.2 动叶、轴封和防侵蚀-腐蚀保护措施	(97)
3.1.3 进汽部件	(105)
3.1.4 轴承	(110)
3.2 末级叶片	(114)
3.2.1 末级叶片长度	(114)
3.2.2 叶根、围带和阻尼器	(121)
3.2.3 末级叶片空气动力学	(126)
3.2.4 末级叶片的水蚀防护	(135)
3.3 汽轮机除水	(136)
3.3.1 级叶片排间的外围水分分离及去除	(137)

3.3.2	通道内部水分分离	(139)
3.3.3	去湿级或级分离器	(143)
3.3.4	外置汽水分离器和再热器	(144)
	参考文献	(150)
	参考书目	(157)
第4章	运行	(165)
4.1	湿蒸汽汽轮机的运行工况	(165)
4.2	湿蒸汽汽轮机效率及热耗性能实验	(184)
4.3	湿蒸汽汽轮机的一般损伤及原因	(196)
4.3.1	应力腐蚀和腐蚀疲劳开裂	(197)
4.3.2	汽轮机汽缸的侵蚀-腐蚀	(205)
4.3.3	叶片损伤	(208)
4.4	采用胺基表面活性剂类型的微型添加剂对蒸汽/水通道进行保护和维护	(212)
4.5	湿蒸汽汽轮机瞬态工况的实验研究与计算	(214)
4.5.1	湿蒸汽汽轮机启动试验	(214)
4.5.2	汽轮机主要设计部件的温度场计算	(231)
4.5.3	启动图的计算优化	(234)
4.6	汽轮机瞬态工况下运行人员的信息支持及自动控制	(242)
	参考文献	(253)
	参考书目	(262)
第5章	整修	(272)
5.1	改造及修理	(272)
5.2	低压缸改造	(275)
5.2.1	用焊接转子替代盘式转子(阿尔斯通公司的经验)	(275)
5.2.2	采用实心转子替代盘式低压转子(西屋公司的经验)	(279)
5.2.3	采用盘式转子改造低压缸(西门子公司的经验)	(280)
5.3	包括高压缸和低压缸的汽轮机完整升级	(283)
5.3.1	西门子公司的升级经验	(283)
5.3.2	三菱重工公司的升级经验	(285)
5.3.3	阿尔斯通公司在圣奥诺弗雷核电站的升级经验	(287)
	参考文献	(289)
	参考书目	(292)

附录 缩略语与符号..... (296)

 电力行业中的机构名称缩写..... (296)

 术语缩写..... (297)

 符号的单位与定义..... (299)

 下标和上标的含义..... (301)

 相似准则..... (302)

 主要单位换算表..... (302)

第 1 章 世纪之交的核电工业

1.1 核电湿蒸汽汽轮机的早期历史

1951 年 12 月 20 日,美国利用试验增殖反应堆 EBR-I(Experimental Breeder Reactor-I)向汽轮发电机组供应蒸汽,生产出由核能产生的最早的电能,该机组汽轮机的额定输出功率为 200 kW,蒸汽初压为 2.8 MPa,初温为 220℃(405 psi,429°F)。1953 年,美国对其第一艘核动力潜艇鹦鹉螺号的蒸汽轮机陆上样机进行了测试。1954 年,前苏联启用了第一个实验核电厂,其额定输出功率为 5 MW。1957 年,第一个用核反应堆提供蒸汽的商用发电机组在希平波特(Shippingport)^[1]投入运行,其汽轮机由西屋公司制造,设计转速为 1 800 rpm,最大功率为 100 MW,工质为干饱和蒸汽,进口蒸汽压力可由最大负荷时的 3.8 MPa(545 psi)变化到反应堆空转时的 5.9 MPa(850 psi)。如图 1-1 所示,该汽轮机是一台单缸、单排汽汽轮机,末级叶片长度为 40 in(1016 mm)。

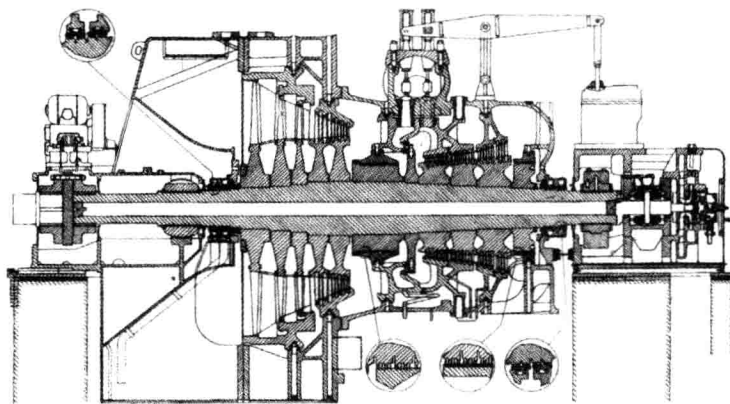


图 1-1 希平波特电厂由西屋公司生产的核电湿蒸汽汽轮机(100 MW,1 800 rpm),1957^[2]

这是第一台为核电厂开发的大功率湿蒸汽汽轮机。该汽轮机中蒸汽的膨胀基本在湿汽区。其主要问题是,随着蒸汽的膨胀,水分含量逐渐增加,而过高的湿度是造成汽轮机叶片侵蚀及效率降低的主要成因。如果由于干饱和蒸汽直接膨胀到凝汽器中的压力,则汽轮机排汽的水分含量可达 20%~25%,具体值取决于进汽压力和凝汽器真空参数。

自 20 世纪 20~30 年代起所积累的采用化石燃料、非再热蒸汽轮机的设计和运行经验为

第一台核电湿蒸汽汽轮机的开发提供了基础。其中,从使用活塞式发动机(蒸汽机)排汽作为工质的后置汽轮机的实践或技术工艺中获得的经验尤为重要。但是,由于这类汽轮机的初始蒸汽压力都相当低,所以排汽湿度都不大,而较低的温度也减轻了腐蚀和侵蚀程度。此外,就核电机组的容量来说(其出力以几百兆瓦计量),所有老式汽轮机的容量都是不够的。由于核电汽轮机的初始蒸汽压力偏低,热降较小,导致汽轮机进汽及排汽端的容积流量都非常大,所以必须考虑这一尺度效应。

从希平波特的汽轮机开始,大多数早期核电汽轮机都设计成低速汽轮机(转速为 1 800 rpm 或 1 500 rpm)。因此,虽然汽轮机的几何尺寸很大,但在提供必要的进、排汽环形通道面积的同时,并不会导致动叶圆周速度过大。为了减少汽轮机排汽的最终湿度并提高循环效率,通常在高压缸及低压缸间布置机械式汽水分离装置。希平波特汽轮机的汽水分离器为静止分离器,进入低压缸的蒸汽干度约为 99%。

设计希平波特的汽轮机时,因为最初的堆芯预计功率只有约 60 MW(后来用 100 MW 的堆芯取代),所以要求部分负荷下效率最高。为了满足该要求,汽轮机设计为旁路式蒸汽调节。第一组 5 个调节阀使蒸汽依次进入互不连通的喷嘴室,由一组喷嘴调节负荷,最高负荷可达 80 MW。负荷更大时,蒸汽可通过第二组 4 个并联的调节阀绕过汽轮机第一级,进入第一级后的汽室。所有 9 个调节阀均安装在汽轮机顶部进汽箱的两个横杆上。汽轮机的高压缸和低压缸气流方向相反,因此高压和低压进汽部件可以安装在汽轮机中部,这样不仅能减小用于平衡轴向推力的平衡活塞直径,而且平衡活塞的泄漏量也能相应减少。为了防止叶片的强烈侵蚀,所有叶顶速度超过 270 m/s(900 ft/s)的叶片进汽边均采用司太立合金片保护。

最初的核电机组大多设计成采用一个反应堆向两台或两台以上的汽轮机平行供汽。双汽轮机核电机组(具有两台并联运行的蒸汽轮机)直到最近仍在使用。该类机组可以减小汽轮机尺寸并防止汽轮机故障时反应堆的强制停堆。不过,随着经验逐渐丰富以及对湿蒸汽汽轮机运行可靠性的信心逐渐增强,单汽轮机运行方案已被广泛采用。随着反应堆功率的提高和汽轮机容量的增大,核电汽轮机一般设计为多缸型式。例如,西屋公司继希平波特(为扬基原子电力公司(Yankee Atomic Electric Company)制造)之后设计的另一台湿蒸汽汽轮机就是双缸结构(双流程高压缸和低压缸),额定功率为 145 MW,采用节流配汽。一般来说,核电汽轮机必须稳定运行在最大负荷下,所以该种配汽方式在核电汽轮机中很典型。最早的核电汽轮机在高压缸和低压缸均采用套装转子(见图 1-1),后来,逐渐被整锻转子和焊接转子取代,而组合转子(带有套装叶轮)使用得很少通常只在低压缸使用。

早期的核电湿蒸汽汽轮机大多只使用除湿装置而不进行再热,直到 1974 年,通用电气公司(GE, General Electric)为阿拉巴马州布朗斯弗里(Browns Ferry)核电厂制造的 1 000 MW、1 800 rpm 湿蒸汽汽轮机投入运行,才开始进行再热。德国 AEG 公司的一台汽轮机甚至在两个不同的压力下进行了两级汽水分离,该汽轮机功率为 670 MW,转速为 1 500 rpm,1971 年在德国 Würgassen 投入运行。然而,随后的大部分湿蒸汽汽轮机都只在高压缸后采用一级或两级蒸汽再热。在反应堆内很难再热蒸汽,尤其是再热蒸汽管路需要两次穿过反应堆安全壳(冷再热蒸汽管和热再热蒸汽管),因此核电湿蒸汽汽轮机需要使用蒸汽-蒸汽再热器。意大利的特里诺维切累斯(Trino Vercellese)核电厂首先使用了主蒸汽(新蒸汽)再热(其汽轮机 Tosi 的功率为 187 MW、转速为 1 500 rpm,1964 年投入运行),而由联合电气公司(AEI, Associated

Electrical Industries)为英国 Winfrith Heath 核电厂生产的 100 MW, 3 000 rpm 蒸汽轮机则首次使用了抽汽再热。随后, 许多核电厂的湿蒸汽汽轮机使用了两级再热(利用主蒸汽和抽汽); 两级再热的概念于 1969 年在美国通用电气公司为牡蛎溪(Oyster Creek)核电厂和九英里峰(Nine Mile Point)核电厂生产的汽轮机上第一次使用(功率分别为 641 MW 和 620 MW, 转速均为 1 800 rpm)。蒸汽-蒸汽再热并不改善循环热效率(这一点不同于化石燃料发电机组运用的火力再热), 但是这种再热方式可以显著减小低压部分的蒸汽湿度, 从而改善机组效率并减轻侵蚀破坏的程度。

电网频率是 60 Hz 时, 湿蒸汽汽轮机的设计转速大多为 1 800 rpm。美国大海湾(Grand Gulf)核电厂由西门子/KWU 制造的 1 306 MW 汽轮机组和帕洛弗迪(Palo Verde)核电厂由通用电气公司制造的 1 359 MW 汽轮机组是 20 世纪 80 年代初最大的半速机组。当电网频率为 50 Hz 时, 因为离心力较小, 所以可在半速及便宜一些的全速(因为尺寸较小)汽轮机组之间选择更经济的机组。1984 年, 最大的 3 000 rpm 核电汽轮机在瑞士戈斯根(Gösgen)(西门子/KWU 公司制造的 970 MW 汽轮机)和莱布施塔特(Leibstadt)核电厂(BBC 公司制造的 1 000 MW 汽轮机)投入运行, 而最大的半速(1 500 rpm)汽轮机也在法国帕卢埃尔(Paluel)核电厂(汽轮机由 CEM 公司生产, 功率为 1 347 MW)和德国克鲁梅尔(Krümmel)核电厂(汽轮机由西门子/KWU 公司生产, 功率为 1 316 MW)投入运行^[3]。

20 世纪 60 年代、70 年代及 80 年代早期发表的一些有价值的专著及论文阐述了核电湿蒸汽汽轮机出现后最初数十年间在设计和运行方面积累的经验。

1.2 核电工业运行业绩

利用核能发出第一度电约 40 年后, 根据国际原子能机构(IAEA, International Atomic Energy Agency)统计, 截至 2000 年底, 全世界正在运行的核反应堆共有 438 个, 总净发电容量为 351 327 MW。由于各种原因, 在某些国家运行的少数核电机组并未计入, 这些国家中有些不是国际原子能机构的成员国, 此外, 还有某些核电机组暂时关闭, 因此上述数据稍有低估。2000 年, 巴西、捷克、印度和巴基斯坦等国启用了 6 个总电功率为 3 056 MW(e)的新反应堆, 另外全球还有在建的核反应堆 33 个, 其中 7 个在亚洲^[4]。随着新的电力机组的启用, 某些旧机组要么退役, 要么被永久或暂时停运。尽管 2002 年捷克、中国和韩国分别投运了 6 个总容量为 5 013 MW 的新反应堆^[5], 但根据国际原子能机构的统计, 截至 2002 年底, 由于旧机组的退役, 全世界共计只有 441 个核动力反应堆, 总净发电容量为 358 660 MW。

尽管近年来世界范围内核电容量的年增幅仍然较低, 但核发电量已经在世界电力生产中占有重要份额(2002 年约占世界发电总量的 16%^[6]), 对许多国家的电力工业作出了巨大贡献, 并且在一些国家的电力工业中占主导地位。表 1-1 列出了对核电依赖程度最高的一些国家的核电产量。法国和立陶宛依赖程度最大, 核电产量超过其总发电量的 70%; 其后的 6 个国家核电所占比例为 40%~60%; 再之后包括美国在内的 8 个国家的比例为 10%~40%^[7]。

表 1-2 列出了 2001 年全球发电量最高的前 50 个核电机组。

表 1-1 各国核电产量(1999)

国家	运行中的反应堆数量 (括号中的数字为 在建反应堆数量)	核电产量/TWh	占总发电量的百分比/%
法国	59(0)	375.0	75.0
立陶宛	2(0)	9.9	73.1
比利时	7(0)	46.6	57.7
保加利亚	6(0)	14.5	47.1
斯洛伐克	6(2)	13.1	47.0
瑞典	11(0)	70.1	46.8
乌克兰	14(4)	67.4	43.8
韩国	16(4)	97.8	42.8
匈牙利	4(0)	14.1	38.3
亚美尼亚	1(0)	2.1	36.4
日本	53(4)	306.9	36.0
德国	19(0)	160.4	31.2
英国	35(0)	91.2	28.9
美国	104 (0)	727.7	19.8
俄罗斯	29(3)	110.9	14.4
加拿大	14(0)	70.4	12.4
南非	2(0)	13.5	7.1
印度	11(3)	11.4	2.7
中国	3(7)	14.1	1.1

数据来源:“Four New Plants Added to World Nuclear Fleet in 1999,” *Power Engineering*, 104(9):26.

表 1-2 按发电量排序的世界前 50 个核电机组(2001)

排名	国家	核电厂名称,机组	反应堆类型	机组总负荷 /MW	总发电量 /GWh
1	德国	伊萨尔,2 (Isar, 2)	压水堆	1 475	12 396
2	德国	布罗克多夫 (Brokdorf)	压水堆	1 440	11 791
3	德国	格罗恩德 (Grohnde)	压水堆	1 430	11 560
4	德国	埃姆斯兰 (Emsland)	压水堆	1 400	11 526
5	德国	下威悉河 (Unterweser)	压水堆	1 410	11 206
6	德国	内卡,2 (Neckar 2)	压水堆	1 365	11 172
7	德国	格拉芬莱因费尔德 (Grafenrheinfeld)	压水堆	1 345	11 154