

国家重点图书出版规划项目

学术出版工程 (第二期)

名家

核工程中的流致 振动理论与应用

Theory and Application of
Flow-induced Vibration
in Nuclear Engineering

姜乃斌 冯志鹏 臧峰刚 等 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



“十三五”国家重点图书出版规划项目
核能与核技术出版工程(第二期)
总主编 杨福家

核工程中的流致 振动理论与应用

Theory and Application of Flow-induced
Vibration in Nuclear Engineering

姜乃斌 冯志鹏 臧峰刚 等 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书根据国内外核工程中流致振动研究的最新成果,结合核电设备与管道的工程设计经验,以涉及流致振动问题的蒸汽发生器、反应堆堆内构件、燃料组件和管道系统为主要对象,论述了流致振动的理论基础、规范要求、分析方法、试验研究、防振设计及工程实例等内容。

本书可供核电和能源化工领域的设计人员、力学分析人员、高校和科研院所流固耦合领域的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核工程中的流致振动理论与应用 / 姜乃斌等编著.

—上海:上海交通大学出版社,2018

核能与核技术出版工程

ISBN 978-7-313-19297-4

I. ①核… II. ①姜… III. ①核电站—设备—研究
IV. ①TM623.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 092772 号

核工程中的流致振动理论与应用

编 著:姜乃斌 冯志鹏 臧峰刚等

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:谈 毅

印 制:上海万卷印刷股份有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:423 千字

版 次:2018 年 9 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-19297-4/TM

定 价:198.00 元

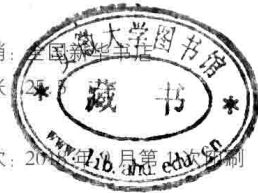
地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:25

印 次:2018 年 9 月第 1 次印刷



版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-56928178

丛书编委会

总主编

杨福家(复旦大学原校长,中国科学院院士)

编委(按姓氏笔画排序)

于俊崇(中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚(中国科学院上海应用物理研究所,中国科学院院士)

马栩泉(清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中(清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周(广西大学资源环境与材料学院院长,教授)

申森(上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英(复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙扬(上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭(中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青(中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆(中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉(上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新(上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光(上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂(中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡思得(中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐铄(中国原子能科学研究院,中国工程院院士)

徐步进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰(中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄钢(上海健康医学院院长,教授)

曹学武(上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程旭(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生(上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

本书编委会

主 编 臧峰刚

编 委(按姓氏笔画排序)

叶献辉 冯志鹏 刘 帅 齐欢欢

姜乃斌 黄 旋 蔡逢春 熊夫睿

总 序

1896年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了70多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资25亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界范围来看,核能应用范围正不断扩大。据国际原子能机构最新数据显示:截至2018年8月,核能发电量美国排名第一,中国排名第四;不过在核能发电的占比方面,截至2017年12月,法国占比约71.6%,排名第一,中国仅约3.9%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多,相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。截至2018年8月,中国投入商业运行的核电机组共42台,总装机容量约为3833万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”

“高温气冷堆”“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是20世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在21世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

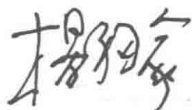
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统整理、总结一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响力的科研工作者。他们都来自各大高校及研究

单位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他图书也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于良好的立意和高品质的学术成果,本丛书第一期于2013年成功入选“十二五”国家重点图书出版规划项目,同时也得到上海新闻出版局的高度肯定,入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。第一期(12本)已于2016年初全部出版,在业内引起了良好反响,国际著名出版集团 Elsevier 对本丛书很感兴趣,在2016年5月的美国书展上,就“核能与核技术出版工程(英文版)”与上海交通大学出版社签订了版权输出框架协议。丛书第二期于2016年初成功入选了“十三五”国家重点图书出版规划项目。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2018年8月

前 言

核电厂蒸汽发生器、反应堆堆内构件、燃料组件、管道系统等设备中存在大量的流体诱发振动现象,由流致振动导致的设备损坏事故时有发生。由于流致振动问题是多学科耦合的复杂物理现象,涉及流体力学、弹性力学、振动力学、流固耦合、两相流理论等多学科领域,相关科学研究一直没有停止。

本书根据国内外流致振动研究的最新理论成果,结合作者的实际工程设计经验,以核工程中流致振动问题相对突出的蒸汽发生器管束、反应堆堆内构件、燃料组件、管道系统等为主要对象,论述流致振动的理论基础、规范要求、分析方法、试验研究、防振设计等内容。涉及的流致振动机理包括湍流激振、流体弹性不稳定、周期性旋涡脱落、声共振等。

全书共分 8 章。第 1 章简述了压水堆核电站流致振动分析涉及的主要部件和所对应的流致振动机理,以及相关研究概况。第 2 章详细地阐述了各种流致振动机理、输流管道流固耦合、微动磨损的理论与准则。第 3 章介绍了流致振动分析所需的结构和流体参数的计算方法。第 4 章分别描述了单向流固耦合和双向流固耦合的流致振动数值分析方法,并介绍了弹性管束的流固耦合特性和涡致振动预测的数值分析。第 5 章给出了蒸汽发生器管束湍流激振和流体弹性不稳定分析的方法、管束的声致振动分析、干燥器的旋涡脱落共振与声致振动评估以及相关防振设计。第 6 章以反应堆堆内构件为对象,介绍了流致振动分析范围、评估准则和分析流程。第 7 章以棒状燃料组件为对象,介绍了棒束结构流致振动分析的最新研究成果及试验和分析方法。第 8 章以典型的含节流孔板管道、温度计套管、三通管道为对象,给出了管路系统流致振动的分析评价方法和最新研究结论。附录 A 列举了与流致振动有关的国内外标准规范的主要内容。附录 B 给出了传热管束流致振动分析软件 SGFIV 的理论手册。附录 C 给出了水中圆柱体的流致振动响应与磨损预测。第 1 章

编写人员为臧峰刚；第 2 章编写人员为姜乃斌、蔡逢春；第 3 章编写人员为齐欢欢；第 4 章编写人员为冯志鹏；第 5 章编写人员为姜乃斌；第 6 章编写人员为黄旋、叶献辉；第 7 章编写人员为冯志鹏；第 8 章编写人员为姜乃斌；附录 A 编写人员为黄旋；附录 B 编写人员为齐欢欢；附录 C 编写人员为冯志鹏；臧峰刚对全书进行了统稿。在本书编著过程中，熊夫睿提供了第 2 章中声致振动模态分析基本原理的相关资料；张丰收进行了蒸汽发生器干燥器的声致振动计算；刘帅进行了三通管的声共振计算。在此，对本书出版提供过帮助的同事一并表示感谢！

感谢国家自然科学基金对本书的资助(基金编号 51606180)。

由于作者水平有限、时间仓促，书中存在的遗缺和偏颇之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

上篇 理论部分

第 1 章 绪论	003
1.1 引言	003
1.2 压水堆核电站流致振动分析涉及的主要对象	006
1.2.1 蒸汽发生器内部构件	006
1.2.2 反应堆堆内构件	009
1.2.3 燃料组件	013
1.2.4 管道及相关部件	014
1.3 研究概况	015
第 2 章 理论基础	017
2.1 湍流激振	017
2.1.1 湍流激振的随机振动理论公式	017
2.1.2 管束湍流激振力功率谱密度函数	020
2.2 流体弹性不稳定	027
2.2.1 单相流体弹性不稳定的数学模型	027
2.2.2 两相流体弹性不稳定的数学模型	034
2.2.3 管束流弹失稳半解析模型详解	037
2.3 旋涡脱落	053
2.3.1 旋涡脱落现象	053
2.3.2 弹性管涡致振动的理论模型	056

2.3.3	预测涡致振动的改进尾流振子模型	067
2.3.4	用尾流振子模型预测弹性管的振动	075
2.3.5	内外流作用下管的振动特性	078
2.4	声致振动	080
2.4.1	声波方程	082
2.4.2	节点流道模型	083
2.4.3	近似声学方程	084
2.4.4	脉动压力谐响应分析	086
2.4.5	基于有限元法的声致振动分析	086
2.4.6	模态分析的基本原理	088
2.5	输流管道的流固耦合	091
2.5.1	管道流固耦合的主要形式	092
2.5.2	管道线性流固耦合振动分析模型	093
2.5.3	输流管道非线性运动方程	098
2.6	微动磨损	108
2.6.1	Archard 磨损模型	108
2.6.2	磨损深度模型	109
2.6.3	Frick 方程模型	110
第3章	流致振动分析参数	113
3.1	基本运动方程	113
3.1.1	静力特性	114
3.1.2	动态特性	114
3.2	结构振动频率与振型	115
3.2.1	理论公式	115
3.2.2	有限元方法	115
3.3	水动力附加质量	118
3.3.1	传热管的水动力附加质量	118
3.3.2	反应堆内的水动力附加质量	120
3.3.3	燃料组件的水动力附加质量	121
3.4	阻尼	121

3.4.1	阻尼的测量方法	121
3.4.2	管子在气体中的阻尼	123
3.4.3	管子在液体中的阻尼	123
3.4.4	管子在两相流中的阻尼	124
3.5	空泡份额	125
3.5.1	现有的空泡份额模型	126
3.5.2	现有模型与实验测量值的对比分析	128
3.5.3	Dowlati 模型和 Schrage 模型的重新拟合	129
3.6	两相流流型	135
3.6.1	管束间两相流流型图	136
3.6.2	不同流型下的激振力时程	138
3.6.3	不同流型下的激振力功率谱密度	145
第 4 章	管束流致振动特性的数值研究	149
4.1	流固耦合数值模型	149
4.1.1	CFD 模型	150
4.1.2	结构分析模型	153
4.1.3	流体-结构间的双向耦合	153
4.2	数值模型的验证	154
4.2.1	网格离散	156
4.2.2	湍流模型比较	158
4.2.3	弹性单管的流致振动响应	160
4.2.4	正方形排列管束的流致振动响应	162
4.3	单弹性管的流致振动特性	162
4.3.1	响应特性	162
4.3.2	流场特性	170
4.3.3	单向耦合与双向耦合的比较	176
4.3.4	与弹性支撑管的比较	178
4.4	双弹性管的流致振动	180
4.4.1	计算模型	180
4.4.2	临界节径比	181

4.4.3	临界流速	183
4.4.4	运动轨迹	186
4.4.5	尾涡结构	188
4.5	管束的流致振动	191
4.5.1	数值模型	191
4.5.2	失稳流速计算	192
4.5.3	管束模型研究	197

下篇 工程应用

第5章	蒸汽发生器流致振动分析与评价	207
5.1	管束端流激振分析	207
5.1.1	非均匀横向流作用下的管束端流激振响应 计算	207
5.1.2	结构模型	208
5.1.3	热工水力参数	209
5.1.4	计算结果分析	211
5.2	管束流体弹性不稳定分析	211
5.2.1	结构参数	211
5.2.2	热工水力参数	212
5.2.3	流体弹性不稳定计算模型	214
5.2.4	计算结果分析	215
5.3	传热管的声致振动分析	216
5.3.1	主泵引起的压力振荡	216
5.3.2	泵致脉动压力	217
5.3.3	有限元模型	219
5.3.4	模态分析	219
5.3.5	谐响应分析	221
5.4	干燥器振动分析	222
5.4.1	干燥器结构简介	222
5.4.2	有限元分析模型	223

5.4.3	旋涡脱落共振评估	224
5.4.4	声致振动分析	227
5.5	管束流致振动的试验研究	230
5.5.1	机理性试验	230
5.5.2	工程验证性试验	234
5.6	防振设计	241
5.6.1	防振设计与准则	241
5.6.2	防振措施	242
第 6 章	反应堆堆内构件流致振动分析与评价	245
6.1	综合评价	246
6.2	理论分析	247
6.2.1	分析内容	247
6.2.2	弱流固耦合分析方法	248
6.2.3	强流固耦合分析方法	250
6.3	基于 CFD 方法的弱流固耦合分析过程	251
6.3.1	有限元模型的建立	251
6.3.2	流体激振力计算	252
6.3.3	振动响应分析	255
6.4	比例模型试验研究	259
6.4.1	试验研究内容	261
6.4.2	试验测点布置	261
6.5	现场实测	263
6.6	堆内构件流致振动检查	263
6.6.1	检查总则	263
6.6.2	堆内构件检查部位	264
第 7 章	燃料组件流致振动分析与评价	265
7.1	流体激励	265
7.2	磨损机理	266
7.3	燃料棒的振动磨损分析	267

7.3.1	燃料棒的振动特性	267
7.3.2	流致振动与磨损响应	268
7.3.3	夹持失效影响研究	269
7.4	试验研究	275
7.4.1	振动试验	275
7.4.2	耐久性试验	277
7.4.3	磨损试验	278
7.4.4	燃料组件中阻尼的测试方法	279
7.5	燃料棒磨损性能的 Monte Carlo 模拟	282
第 8 章	管道及相关部件的流致振动分析	295
8.1	含节流孔板的管道流致振动激励特性和响应分析	295
8.1.1	孔板诱发输流管道振动的机理	296
8.1.2	湍流激振的理论表达	298
8.1.3	孔板诱发脉动压力测量实验	305
8.1.4	管道随机振动响应的计算	309
8.2	反应堆冷却剂回路温度计套管流致振动分析	315
8.2.1	温度计套管结构、材料和流体性能	315
8.2.2	温度计套管固有频率和旋涡脱落频率	316
8.2.3	横向流动中温度计套管的响应	317
8.2.4	温度计套管的振动疲劳分析	318
8.3	三通管道的旋涡脱落与声共振	319
8.3.1	研究现状	321
8.3.2	旋涡脱落分析模型研究	323
8.3.3	声共振分析	330

附 录

附录 A	国内外相关标准规范	337
A.1	RG 1, 20	337
A.1.1	堆内构件分类	337

A. 1. 2	原型堆的综合评价大纲·····	339
A. 1. 3	非原型 I 类的综合评价大纲·····	340
A. 1. 4	非原型 II 类的综合评价大纲·····	340
A. 1. 5	非原型 III 类的综合评价大纲·····	341
A. 1. 6	非原型 IV 类的综合评价大纲·····	342
A. 1. 7	新旧版 RG 1. 20 对比 ·····	342
A. 2	ASME 附录 N-1300 ·····	344
A. 3	GB151—1999 附录 E ·····	344
A. 4	TEMA 第六章 ·····	345
A. 5	其他关于流致振动的标准规范 ·····	346
A. 5. 1	HAD102/08《核电厂反应堆冷却剂系统及其 有关系统》·····	346
A. 5. 2	HAF201《研究堆设计安全规定》·····	346
附录 B	传热管束流致振动分析软件(SGFIV)理论手册 ·····	347
B. 1	术语及定义 ·····	347
B. 2	物理模型及相关数学模型 ·····	348
B. 2. 1	模型总体说明 ·····	348
B. 2. 2	模型详细说明及计算方法 ·····	349
附录 C	圆柱体的流致振动响应与磨损预测 ·····	351
C. 1	湍流激振 ·····	351
C. 1. 1	圆柱体的振动响应 ·····	351
C. 1. 2	湍流激励谱·····	352
C. 1. 3	湍流产生的能量谱·····	352
C. 1. 4	基于对激励类型做特别假设的有效计算·····	353
C. 1. 5	轴向、横向湍流引起的振动振幅 ·····	355
C. 2	流弹失稳 ·····	357
C. 2. 1	稳定性准则 ·····	357
C. 2. 2	有效横流速度·····	357
C. 3	旋涡脱落 ·····	357