



HE DIAN YUNXING JISHU ZHICHI
JICHU JI YINGYONG
核电运行技术支持

—— 基础及应用

张家倍 马琳伟 鲁红权 等 编著

上海科学技术出版社

核电运行技术支持

——基础及应用

张家倍、马琳伟、鲁红权等 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电运行技术支持：基础及应用/张家倍等编著. —上海：上海科学技术出版社，2010.1

ISBN 978 - 7 - 5323 - 9992 - 5

I. 核… II. 张… III. 核电站 - 运行
IV. TM623.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 157386 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

上海××××印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 00 字数 000

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

印数：1—

ISBN 978 - 7 - 5323 - 0000 - 0

定价：00.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题，
请向承印厂联系调换

内容提要

本书主要依据美国等国外成熟的核电运行技术支持的标准，并参考国内外的相关经验和文献，系统介绍了核电运行技术支持的相关理论基础和应用技术。

全书共 8 章，包括：概述；核电标准和 ASME 规范；金属的疲劳；腐蚀及其控制；机械振动；根本原因分析；核电站的老化管理；核电站延寿及寿期管理。在每一章中，作者不但从理论上阐述了问题的本质，而且提出了具体解决问题的方法。尤其是结合核电站已发生的实际案例进行分析，从而使读者能够更加深刻、全面地了解问题的现象、本质和处理方法。

本书是国内第一本系统介绍核电运行技术支持的专业读本，内容全面，案例丰富，可供从事核电事业的技术人员和管理人员阅读，也是高等院校有关专业师生的参考读物。

谨此献给：

开拓中国核电运行技术支持行业的人们！

近 10 年来,我一直在思考着这样一个问题:中国何时能够建立一个独立的、专业的、特殊的核电运行技术支持服务体系?

事实上,在过去的半个世纪中,只有美国建立了独立的核电运行技术支持行业。在美国,这个行业的积聚和发展已经到了炉火纯青的地步。它的最大优势就是:面对变化异常的对象和环境,强调对系统的精辟解释;迅速对异常事件完成分析和设计,并采用现代的前沿技术去完成服务。这种服务的结果是:在非常短促的时间内,在极其恶劣的环境中,在严密设计的指导下,采用特殊制作的设备,去完成对对象的局部修理,并使之百分之百地符合或大大超过原来的标准要求。

对于维修,人们常常会使用单向思维,即:买东西,找厂家;出问题,也找厂家。实际上,即使是处理电视机、摄像机之类商品的问题,现在这种思维也已经是行之无效了。因为任何一个维修服务体系,一定是独立于原始设备生产商(Original Equipment Manufacturer, OEM)生产体系的。至于面对核电系统问题时,那更是另当别论了。这不仅因为故障部位经常难以捉摸,也不仅因为客户正在蒙受着经济的巨大损失,同时还因为必须在有限的时间内追根寻源,更因为要面对影响人类社会的安全问题。

大家知道,OEM 在产品生产的整个过程中是具有高度稳定性的。这种稳定性充分地体现在它的环境、设计、生产、检验和安装的全部过程中。这种稳定性意味着 OEM 产品生产的目标和过程都是可控的。而独立的核电运行技术服务恰恰与 OEM 相左。无论是对象还是环境,无论是设计还是作业,无论是检验还是安装都是未知的、动态的、特殊的和意外的。正因如此,需要采用独特的技术、独特

的工具、独特的设计、独特的管理、独特的作业及独特的人群去完成这类服务。核电历史表明：美国核电花了几乎 10 年，才被迫接受这种独立的核电运行技术支持服务。原因很简单，产品在运行前和运行后发生了本质的变化。

简单总结，美国的核电运行技术支持行业大致有以下三个特点：

其一，现代美国核电运行技术支持行业的形成是由核电存在和发展的需求所推动的。因为需要成本和质量的统一，美国的核电运行技术支持的技术特色就是一技多用和个性化服务。以堆焊(Overlay)为例，小至冠密封焊缝(Canopy Seal Welds, CSW)，大到压力罐；细至测管套，粗到波动管，20 多年来，它不断地、反复地重复着这个概念、方法和原理。但是，面对每次服务，它的设计和作业决不重复。因此，如果要总结美国核电运行技术支持特点的话，那就是在一技多用的概念、方法和原理的背后，存在着一种唯一的、排他的、不可重复的个性化服务。一切从当前的实际出发是美国核电运行技术支持的一个鲜明特点。核电运行技术支持强调：每一个事件只给我们一次机会。

其二，现代美国核电运行技术支持行业的作业覆盖了研究、分析、设计、服务的全过程。因为需要系统和局部的统一，美国核电运行技术支持的作业特色就是理论和实际相结合。由于解决局部问题的同时，必须满足系统的全部需求，于是这种合力就迫使理论和实际结成了唇齿相依的关系。这种关系不仅使核电运行技术支持具有技术和经济的主导和优势，同时，这种竞争的主导和优势使该

行业获得了市场的空间和利益。更为重要的是：这种市场空间和利益又进一步地推动着该行业实体去开发新的技术和理论。几近30年的良性循环，以 Structural Integrity Associates, Inc. (简称 SI) 为代表的核电运行技术支持公司，从标准、理论、技术和应用上确立了自己在核电界的地位。它既淘汰了迂腐保守的技术观念，又洗净了市场先天的商业铅华，它以解决实际问题为天职的敬业表现，建立了自己的绝对服务优势，同时与(美国)电力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)结成了天然同盟，并使OEM亦步亦趋。

其三，现代美国核电运行技术支持行业的成果造就了一个极其辉煌的美国核电站运行史。因为需要安全和效益的统一，美国核电运行技术支持的理论特色就是变应急抢修为预防维修。就是这个以安全为中心，以预防为手段的历史真实，使美国这个拥有全世界核电反应堆近二分之一的国家，即便反应堆已全部进入更年期时，仍然鲜有重大核事故的发生。究其原因就是美国有一个核电运行技术支持行业。这个行业的全体每一分钟都在注视着核电运行。它与核电运行公司心心相印，步步同行。(美国)核管理委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)和 EPRI, 一方面支持核电运行技术支持行业新技术、新理论的开发；另一方面又及时地普及新技术，最后又不失时机地将新技术转变成预防性技术。这种多次对技术的提升和使用，确保了美国核电的安全，汇成美国核电安全的主流。

借鉴美国核电运行技术支持的做法，鲍威能源技术设备(上海)

有限公司(简称鲍威能源)的战略目标是:在中国建立起一个平台,以复制 SI 的核电运行技术支持业务。鲍威能源期望在 5 年内,用自己的力量建立起两个小组,即:应力、断裂和热力系统分析小组;疲劳、振动和材料综合应用小组。这两个小组不仅是与美国接轨的、工作在核电运行技术支持前沿的、具有快速拓殖能力的研究机构,同时也是具有解决实际问题能力的、忠实于标准和法则的、富于创造性的工作平台。

我们所期望的是:为中国核电运行技术支持行业的成长而努力。

鲍威能源技术设备(上海)有限公司总经理

张家倍

2009 年于上海

核电运行技术支持服务体系是一个针对在役核电站的技术支持体系。这个支持体系的基本特点是能够对在役核电站提供系统、完整、专业、实际、快速的技术服务。

核电运行技术支持服务体系是一个集理论、技术、工程、设计、管理和实施为一体的特殊行业。它是在役核电站运行的安全、可靠、经济和高效的保障。

核电运行技术支持服务体系是核电运行管理的核心,是核电工业发展的基础行业,是核电工业发展成熟的标志,是核电工业安全体系的重要基石。

众所周知,核电站工程是一个系统工程,从设计、建设到运行、维护,各个阶段既有独立性,又有相关性。特别是核电站的运行和维护,由于核电特殊的安全性和专业性,它需要大量的专业技术以支持核电站的安全运行。所以,核电运行技术支持需要多学科的技术的支持,特别是金属材料、断裂力学、腐蚀工程、振动分析、无损检测等科学技术的支持。

本书以核电发展为导向,以核电安全为目标,以核电运行为任务,全面介绍核电运行技术支持所涉及的基本理论和基础,以及相关解决方案,并辅以实际工程案例。全书内容包括8章:第1章简要介绍了核电站相关基础知识和核电运行技术支持所包含的内容;第2章介绍了核电的规范,主要是美国机械工程师协会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)的规范;第3章和第4章分别介绍了金属疲劳、断裂和腐蚀及腐蚀控制的相关知识;第5章介绍了振动分析的方法;第6章介绍了根本原因分析方法;第7章和第8章介绍了核电站的老化管理和核电站延寿的相关内容。

本书中的大部分资料来源于 Structural Integrity Associates, Inc., 其总部位于美国加州, 是一个为核电运行提供预防、控制、分析、评估、设计、鉴定和咨询的权威机构; 本书同时也得到 Richard A. Mattson 和 Marcos L. Herrera 的大力支持和帮助, 在此一并表示感谢! 在本书的编写过程中也参考了诸多其他文献, 恕不一一指出。限于作者水平, 本书难免存在疏漏和缺点, 敬请各位读者提出批评和指正。

鲍威能源技术设备(上海)有限公司副总经理 马琳伟
2009年8月

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 核电的发展	1
1.2.1 核电的诞生	2
1.2.2 核电的沉寂	3
1.2.3 核电的复苏	3
1.2.4 中国的核电	6
1.3 核电站系统	11
1.3.1 核电站设备	11
1.3.2 核电站主要类型	13
1.4 核电站运行和核电运行技术支持	17
1.4.1 核电站运行重要环节	18
1.4.2 核电运行技术支持的服务项目	19
1.4.3 核电运行技术支持的发展现状	19
1.4.4 核电运行技术支持的管理内容	20
思考题	24
主要参考文献	24
第 2 章 核电标准和 ASME 规范	25
2.1 引言	25
2.2 美国的核电标准	26
2.2.1 美国核管理委员会	26
2.2.2 核电标准管理体系	26
2.2.3 核电标准制定方法	28
2.2.4 标准的执行与发展	28
2.3 欧洲的核电标准	31
2.3.1 概述	31
2.3.2 法德英的核电标准	32
2.3.3 欧共体的标准使用	33

2.4	中国的核电标准	38
2.4.1	中国核电标准的管理机构	38
2.4.2	中国核电标准的编制	39
2.4.3	中国核电标准的内容	40
2.4.4	中国核电标准的主要问题	41
2.5	ASME 规范	42
2.5.1	概述	42
2.5.2	ASME BPVC 第三卷	45
2.5.3	ASME BPVC 第 XI 卷	46
2.5.4	ASME BPVC 学习要点	49
	思考题	51
	主要参考文献	51
第 3 章	金属的疲劳	53
3.1	引言	53
3.2	疲劳基础	54
3.2.1	材料的疲劳	54
3.2.2	疲劳分类	55
3.2.3	疲劳载荷谱	55
3.2.4	疲劳曲线	57
3.2.5	疲劳失效过程	60
3.3	疲劳失效分析	63
3.3.1	疲劳失效的依据	63
3.3.2	疲劳失效类型和原因的分析	66
3.4	疲劳测试	70
3.4.1	恒幅疲劳测试	70
3.4.2	低周疲劳测试	71
3.4.3	测试结果影响因素	73
3.5	疲劳寿命分析	79
3.5.1	疲劳寿命分析方法	79
3.5.2	缺陷零件疲劳寿命预测	81
3.6	疲劳强度增强	84
3.6.1	疲劳设计	84
3.6.2	零件选材	85
3.6.3	制造工艺	85
3.7	疲劳设计标准	86
3.7.1	疲劳部件的分类	86
3.7.2	ASME BPVC 第三卷中相关疲劳设计标准	86
3.8	疲劳案例的分析	87

3.8.1	微动磨损与微动疲劳的概念	87
3.8.2	微动疲劳的断裂力学分析	89
3.8.3	微动磨损对疲劳强度的影响	89
	思考题	92
	主要参考文献	93
第4章	腐蚀及其控制	94
4.1	引言	94
4.2	金属腐蚀基础	94
4.2.1	金属腐蚀的定义及分类	94
4.2.2	金属腐蚀的危害	98
4.2.3	金属腐蚀程度的评定	101
4.2.4	金属的化学腐蚀机理	103
4.2.5	金属的电化学腐蚀热力学	107
4.2.6	金属的电化学腐蚀动力学	110
4.2.7	金属的物理溶解腐蚀机理	117
4.2.8	金属腐蚀的影响因素分析	118
4.2.9	金属腐蚀的防护	121
4.2.10	防腐蚀工程的相关认知	124
4.3	核电站中的腐蚀问题	125
4.3.1	核电站中的电化学腐蚀	125
4.3.2	核电站中的腐蚀形态分类	127
4.3.3	核电站中的常用金属材料	127
4.4	核电站中的全面腐蚀	129
4.4.1	全面腐蚀概述	129
4.4.2	核电站中重要的全面腐蚀——硼酸腐蚀	133
4.5	核电站中的宏观局部腐蚀	138
4.5.1	电偶腐蚀	138
4.5.2	流动加速腐蚀	140
4.5.3	缝隙腐蚀	143
4.6	核电站中的微观局部腐蚀	146
4.6.1	点蚀	146
4.6.2	晶间腐蚀	151
4.6.3	腐蚀疲劳	154
4.6.4	应力腐蚀开裂	155
4.7	核电站中重要部件的腐蚀	161
4.7.1	压水堆蒸汽发生器的腐蚀	161
4.7.2	堆内构件的辐照促进应力腐蚀开裂	165
4.7.3	埋地管道腐蚀	167

思考题	171
主要参考文献	171
第 5 章 机械振动	172
5.1 引言	172
5.2 机械振动基础	173
5.2.1 机械振动的定义	173
5.2.2 机械振动的分类	173
5.2.3 机械振动的基本术语	176
5.2.4 机械振动的有限元动力响应分析法	178
5.3 机械振动的解析	179
5.3.1 单自由度系统振动	179
5.3.2 多自由度系统振动	185
5.3.3 两种重要的振动形式	186
5.4 机械振动测试和振动数据分析	188
5.4.1 机械振动测试	189
5.4.2 振动数据分析	197
5.5 机械振动故障诊断及常见振动原因	200
5.5.1 机械振动的故障诊断	200
5.5.2 机械振动的故障原因	204
5.6 流致振动	207
5.6.1 概述	207
5.6.2 流致振动的分类	208
5.6.3 流致振动的危害	208
5.6.4 流致振动产生的机理	209
5.6.5 流致振动的案例	213
5.7 机械振动疲劳	214
5.7.1 概述	214
5.7.2 机械振动疲劳的管理规范	214
5.7.3 机械振动疲劳管理的案例——小管径管线的机械振动疲劳管理	215
思考题	216
主要参考文献	216
第 6 章 根本原因分析	218
6.1 引言	218
6.2 概述	219
6.2.1 根本原因的概念和特征	219

6.2.2	根本原因分析的概念和方法	219
6.3	事故原因分析的方法	220
6.3.1	故障模式影响分析法	221
6.3.2	失效分析法	223
6.4	根本原因分析的实施	226
6.4.1	概述	226
6.4.2	根本原因分析的步骤	227
6.5	根本原因分析的案例	230
6.5.1	核电站汽轮机旁路系统排放阀部件断损案例	230
6.5.2	核电站中的循环水泵气囊密封件损坏案例	231
	思考题	234
	主要参考文献	234
第7章	核电站的老化管理	235
7.1	引言	235
7.2	概述	236
7.2.1	核电站老化管理的概念和准则	236
7.2.2	核电站老化管理的方法	236
7.2.3	核电站老化管理的步骤	237
7.2.4	核电站老化管理的主要对象	243
7.3	老化管理计划	245
7.3.1	核电站老化管理计划的定义和类型	245
7.3.2	核电站老化管理计划的制定	246
7.3.3	核电站老化管理计划的评估	246
7.3.4	美国核电站的老化管理计划	247
7.4	通用老化经验报告	250
7.4.1	GALL 报告简介	250
7.4.2	GALL 报告列举的老化管理计划评估系统	251
7.4.3	GALL 报告中的老化管理计划介绍	253
7.4.4	GALL 报告中的老化管理计划举例	257
7.5	压水堆关键金属部件的老化机理研究	262
7.5.1	压水堆关键金属部件的老化评估选择	262
7.5.2	压水堆关键金属部件的老化机理分析	263
7.5.3	压水堆关键金属部件的老化评估技术	267
7.6	老化管理的案例——中国大亚湾核电站的老化管理介绍	268
7.6.1	核电站老化管理的审查	269
7.6.2	核电站老化管理的实施	269
	思考题	270
	主要参考文献	270

第 8 章 核电站延寿及寿期管理	272
8.1 引言	272
8.2 核电站延寿概述	273
8.2.1 核电站延寿的背景	273
8.2.2 核电站延寿的现状	275
8.2.3 核电站延寿的基本原则	276
8.2.4 核电站延寿的指导文件	277
8.2.5 核电站延寿的流程	278
8.2.6 美国帕里塞德核电站的延寿案例	285
8.3 核电站延寿中的关键问题	287
8.3.1 老化部件的疲劳失效监测	287
8.3.2 非能动部件的时限老化分析	288
8.4 核电站寿期的系统管理	289
8.4.1 核电站寿期管理概述	289
8.4.2 核电站寿期管理的关键	291
8.4.3 核电站寿期管理的实施	296
思考题	299
主要参考文献	299
附录 本书常用英文缩略词	301
后记	305