



电力科技专著出版资金资助项目

大容量电站锅炉 可靠性与寿命的 设计及评定

史进渊 杨 宇 邓志成 著
于显龙 李立人 吾之英



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



大容量电站锅炉 可靠性与寿命的 设计及评定

史进渊 杨 宇 邓志成 著
于显龙 李立人 吾之英

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

电站锅炉的可靠性设计、寿命设计、可靠性大纲,是制造行业、高校与科研单位关注的关键技术;电站锅炉的可靠性统计、可靠性评定、失效分析、寿命评定、安全性评价,也是电力行业、高校与科研单位关注的关键技术。

本书是一本介绍电站锅炉可靠性设计与寿命评定的学术专著,反映了该领域最新的科研成果。本书全面阐述了大容量电站锅炉可靠性和寿命学科的原理和应用。内容主要包括:大容量电站锅炉的可靠性统计、可靠性评定、强度可靠性设计、振动可靠性设计、系统可靠性设计、可靠性大纲、失效分析、寿命设计与评定及安全性评价。

本书供从事电站锅炉设计、制造、运行、检修、研究的工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大容量电站锅炉可靠性与寿命的设计及评定/史进渊等著. —北京:中国电力出版社, 2008
ISBN 978-7-5083-8021-6

I. 大… II. 史… III. ①火电厂-锅炉-可靠性设计
②火电厂-锅炉-寿命-评估 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 157582 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
北京盛通印刷股份有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 9 印张 232 千字 3 彩页
印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

国内外现有的锅炉专著、锅炉教材和锅炉手册，均用锅炉效率评价锅炉的经济性，并重点介绍锅炉效率的计算方法和试验方法。至今还没有一本专著全面介绍锅炉的可靠性设计方法、可靠性统计与可靠性评定方法、寿命设计与寿命评定方法、安全性评价方法等内容。现有的锅炉承压部件强度计算方法，采用了安全系数设计法，可以判断锅炉部件强度设计是否安全，但还无法解释有些锅炉承压部件设计是安全的，在运行中这些承压部件却发生损坏的现象。

根据电力可靠性统计数据，电站锅炉事故引起的非计划停运时间约占大容量火电机组非计划停运时间的30%~65%，表明电站锅炉是火电机组可靠性的薄弱环节，改进和提高电站锅炉的可靠性可以有效地提高火电机组的可靠性水平，并产生巨大的社会效益和经济效益。

国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》把“重大产品和重大设施寿命预测技术”列为未来15年攻克的27项前沿技术之一，内容包括重大产品、复杂系统和重大设施的可靠性、安全性和寿命预测技术。电站锅炉属于重大产品和复杂系统，其可靠性、安全性和寿命预测技术已经成为大容量电站锅炉设计、生产及使用的前沿技术和关键技术。电站锅炉的特点是产品大、生产批量小、可修复、昼夜连续运行，可靠性试验在实验室无法进行，可靠性评定的技术难度很大。电站锅炉结构复杂，处于高温、高压、腐蚀、磨损等工作环境，可靠性设计的技术难度很大。电站锅炉体积庞大、系统复杂，可靠性涉及产品设计、

材料、制造、安装、运行和检修各个领域，可靠性增长和寿命评定的技术难度很大。目前国内高参数、大容量火电机组纷纷投产，对电站锅炉的可靠性和寿命提出了很高的要求。

从20世纪80年代初起，上海发电设备成套设计研究院起步研究电站锅炉可靠性，在锅炉可靠性统计、可靠性评定、可靠性设计、可靠性增长、失效分析、寿命设计、寿命评定和安全性评价等方面积累了一定的经验。进入21世纪，电力工业快速发展，超临界和超超临界锅炉大量投运，对电站锅炉的可靠性设计和寿命评定又提出了新的要求。为此，作者结合上海发电设备成套设计研究院长期以来在此领域研究所取得的科研成果，并参考国内外相关文献资料，撰写了这本书，目标是建立大容量电站锅炉可靠性设计和寿命评定的技术体系。

本书由史进渊、杨宇、邓志成、于显龙、李立人、吾之英共同撰写，其中第一章至第五章、第九章由史进渊撰写；第六章由杨宇和邓志成撰写；第七章由于显龙撰写；第八章的第一节由李立人撰写，第二节由吾之英撰写，第三节和第四节由史进渊撰写；全书由史进渊统稿。

第一章的内容来源于史进渊负责的“七五”和“八五”科技攻关课题及其起草的技术标准；第二章、第六章的内容来源于史进渊和杨宇负责的“九五”科技攻关课题；第三章至第五章的内容来源于史进渊、杨宇和邓志成负责的“十五”科技攻关课题与史进渊负责的2006年国家863课题；第七章的内容总结了于显龙负责的课题组几十年从事锅炉部件失效分析积累的经验；第八章的内容来源于李立人负责的“七五”与“十五”科技攻关课题和吾之英等人负责的锅炉材料剩余寿命研究课题；第九章的内容来源于史进渊负责的锅炉安全性评价研究课题。作者单位承担的国家和省部级“七五”至“十五”科技攻关项目“大型火电设备

可靠性分析研究”、“哈尔滨 600MW 锅炉可靠性技术研究”、“东方配 300MW 机组锅炉可靠性研究”、“300MW 火电机组可靠性增长技术的研究和应用”、“超临界 600MW 锅炉可靠性设计技术研究”等任务，部分研究成果已反映在本书中。本书的研究得到了国家高技术研究发展计划（863 计划）研究课题“发电机组寿命与广义可靠性设计与分析技术研究”（2006AA04Z403）的资助，同时也得到了国家科技支撑计划研究课题“电站锅炉长周期运行安全保障关键技术研究及工程示范”（2006BAK02B03）的资助。本书编写过程中，得到了作者单位领导和多位业内专家的指导和帮助，上海交通大学教授蒋安众和中国动力工程学会副理事长教授级高工程钩培仔细阅读了本书初稿，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此向他们表示衷心的感谢。

尽管我们在撰写过程中利用了电站锅炉可靠性、寿命与安全性的研究成果，并结合现场实践，做到理论联系实际，解决电站锅炉的可靠性、寿命与安全性的设计和评定问题，但电站锅炉的可靠性、寿命与安全性内容广泛，且极为复杂，目前很多问题尚未得到解决，因此本书有不少内容属于探索性的。限于我的水平且电站锅炉可靠性与寿命技术发展迅速，书中可能会有疏漏与不妥之处，诚恳欢迎读者批评指正。

期望本书的出版能促进我国电站锅炉可靠性设计与寿命评定技术的推广和应用。

作者

2008 年 8 月

目 录

前言

第一章 锅炉的可靠性统计	1
第一节 锅炉可靠性的术语定义	1
第二节 锅炉可靠性特征量的计算公式	14
第三节 锅炉可靠性薄弱环节统计分析	18
第四节 发电机组可靠性统计方法比较	21
第五节 锅炉及发电机组可靠性统计结果	31
参考文献	44
第二章 锅炉的可靠性评定	45
第一节 可靠性的区间估计技术	46
第二节 可靠性验证试验技术	67
第三节 可靠性增长分析技术	86
参考文献	96
第三章 锅炉强度的可靠性设计	98
第一节 部件强度设计可靠性的计算原理	98
第二节 承压部件强度可靠性设计量的分布参数	103
第三节 承压部件强度设计可靠性的计算模型	123
第四节 承压部件强度的可靠性设计方法	136
参考文献	148
第四章 锅炉振动的可靠性设计	149
第一节 锅炉振动设计可靠性的计算原理	149
第二节 尾部受热面声振动的可靠性设计	152
第三节 换热器流体弹性振动的可靠性设计	158
参考文献	163

第五章 锅炉系统的可靠性设计	165
第一节 锅炉可靠性设计的特征量	165
第二节 锅炉非承压部件可靠度计算方法	166
第三节 锅炉部件可用度的计算方法	167
第四节 子系统可靠度与可用度计算模型	171
第五节 锅炉系统可用系数的计算模型	175
参考文献	179
第六章 锅炉的可靠性大纲	181
第一节 锅炉可靠性总体要求	181
第二节 锅炉可靠性详细要求	186
参考文献	200
第七章 锅炉部件的失效分析	201
第一节 锅炉部件失效分析的作用	201
第二节 锅炉重要部件的失效分析	204
参考文献	231
第八章 锅炉部件的寿命设计与评定	232
第一节 承压部件的寿命设计	232
第二节 高温承压部件的寿命评定	244
第三节 烟侧腐蚀的剩余寿命评定	250
第四节 锅炉易损件的寿命评定	253
参考文献	261
第九章 锅炉部件的安全性评价	263
第一节 锅炉部件安全性评价方法	263
第二节 热交换管的安全性评价	274
参考文献	282

锅炉的可靠性统计

本章介绍了电站锅炉可靠性统计方法,包括表示电站锅炉可靠性的 48 个常用术语,统计电站锅炉可靠性使用的 16 个状态术语、8 个容量术语、28 个时间术语定义和 28 个可靠性特征量的计算公式。给出了电站锅炉可靠性薄弱环节的统计方法 and 应用实例。讨论了中国与美国发电设备可靠性统计评价标准的差异,分析了北美电力可靠性协会(NERC)可靠性统计技术的术语定义和可靠性特征量的计算公式,给出了发电机组与电站锅炉的可靠性统计结果。

第一节 锅炉可靠性的术语定义

本节主要介绍电站锅炉可靠性的常用术语和统计评价电站锅炉或火电机组可靠性使用的术语定义,内容包括电站锅炉或火电机组可靠性的基本概念、状态划分、状态术语、容量术语和时间术语定义。依据国内外标准及本章参考文献[1~5]给出了统计和评价电站锅炉或火电机组可靠性的术语定义,可应用于电站锅炉或火电机组的可靠性统计和可靠性管理。

一、锅炉可靠性常用术语

1. 产品 Product

能够被单独考虑的任何元器件(part)、零部件(component)、设备(equipment)或系统(system)。它可以由硬件、软件或兼有两者组成,在某些情况下还可包括人。产品可以指产品总体或产品的一个子样。

2. 可靠性 Reliability

产品在规定条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

3. 维修性 Maintainability

在规定条件下并按规定的程序和手段实施维修时，产品在规定的使用条件下，保持或恢复能执行规定功能状态的能力。

4. 可用性 Availability

在要求的外部资源得到保证的前提下，产品在规定的条件下和规定的时刻或时间区间内处于可执行规定功能状态的能力。它是产品可靠性、维修性和维修保障性的综合反映。这里的外部资源不同于维修资源，它对产品的可用性是没有影响的。产品广义可靠性为包括产品可靠性、维修性的可用性。

5. 可信性 Dependability

用于表述可用性及其影响因素(可靠性、维修性和保障性)的集合术语。它一般用于非定量描述的场合。

6. 安全性 Safety

不导致人员伤亡，危害健康及环境，不给设备或财产造成破坏或损伤的能力。

7. 失效 Failure

产品终止完成规定功能的能力的事件。

8. 故障 Fault

产品不能执行规定功能的状态。预防性检修或其他计划性活动或缺乏外部资源的情况除外。故障通常是产品本身失效后的状态，但也可能在失效前就存在。

9. 寿命 Life

(1) 对不可修复的产品指发生失效前的累计工作时间。

(2) 对可修复产品指相邻两故障间的工作时间，这时也称无故障工作时间。

10. 寿命单位 Life Units

对产品工作时间的度量(如小时、年、次数等)。

11. 可靠性大纲 Reliability Program

为确保产品满足规定的可靠性要求而制定的一套文件，它包括工作进度、组织机构及其职责、工作项目、工作程序、需要的资源等。

12. 可靠性管理 Reliability Management

为了确定和满足产品可靠性要求，所必须进行的一系列组织、计划、协调、监督等工作。

13. 可靠性计划 Reliability Plan

根据可靠性大纲的要求作出具体安排的文件。

14. 可靠性程序 Reliability Procedure

可靠性程序是指对研制、生产过程中可靠性工作内容及其先后联系的顺序所做的一种规定，它包括研制、生产过程中可靠性工作的阶段划分以及各阶段的主要任务与工作步骤。可靠性程序是可靠性计划的重要组成部分。

15. 可靠性模型 Reliability Model

用于预计或估计产品可靠性的一种数学模型。

16. 可靠性预测 Reliability Prediction

根据产品各组成部分的可靠性状况来预测产品在规定条件下的可靠性所进行的工作。

17. 可靠性分配 Reliability Allocation; Reliability Apportionment

产品设计阶段，将产品的可靠性定量要求按给定的准则分配给各组成部分的过程。

18. 故障报告、分析、纠正措施系统 FRACAS Failure Reporting Analysis & Correction Action System

通过及时报告产品发生的故障，分析故障原因，并采取有效的纠正措施，防止故障再现，从而实现可靠性增长，以保证达到并保持产品质量和可靠性的一种管理系统。

19. 故障模式与影响分析 FMEA Fault Modes and

Effects Analysis

研究产品的每个组成部分存在的故障模式并确定各个故障模式对产品其他组成部分和产品要求功能的影响的一种定性的可靠性分析方法。

20. 故障模式、影响与危害度分析 FMECA Fault Modes, Effects and Criticality Analysis

同时考虑故障发生概率与故障危害度等级的故障模式与影响分析。

21. 故障树 FT Fault Tree

表示产品的哪些组成部分的故障模式或外界事件或它们的组合导致产品的一种给定故障模式的逻辑图。

22. 故障树分析 FTA Fault Tree Analysis

以故障树的形式进行分析的方法,它用于确定哪些组成部分的故障或外界事件或它们的组合可能导致产品的一种已给定的故障模式。

23. 潜在电路分析 Sneak Circuit Analysis

在产品的所有组成部分均正常工作条件下,确定抑制正常功能或诱发不正常功能的潜在电路的一种分析技术。

24. 元器件和电路的容差分析 Circuit and Item Tolerance Analysis

预测电路性能参数稳定性的一种分析技术。研究电子元器件和电路在规定的使用条件范围内,电路组成部分参数的容差对电路性能容差的影响。容差分析方法实际上是性能参数稳定性预测的方法。

25. 设计评审 Design Review

对现有的或建议的设计所做的正式的和独立的检查,用于找出和补救可能影响可靠性、维修性、可用性,对设计中的不足提出可能的改进。

26. 可靠性改进 Reliability Improvement

有目的地通过消除系统性失效的原因和(或)降低其他失效的

发生概率,使产品的可靠性得到提高的过程。

27. 可靠性增长 Reliability Growth

随着产品设计、研制、生产各阶段工作的逐渐进行,产品故障模式的逐渐消除及产品的逐步完善,产品的可靠性特征量逐步提高的过程。

28. 可靠性增长试验 Reliability Growth Test

为了发现产品的可靠性薄弱环节,并证明改进措施能防止可靠性薄弱环节再现而进行的试验。

29. 可靠性验证试验 Reliability Compliance Test

证明产品或零件与可靠性的有关参数是否达到所要求的水平而进行的试验。

30. 可靠性测定试验 Reliability Determination Test

为了确定产品的可靠性特征量的数值而进行的试验。

31. 现场可靠性试验 Field Reliability Test

在现场使用条件下进行的可靠性验证或测定试验。

32. 现场数据 Field Data

在现场使用中得到的观测数据。

33. 筛选试验 Screening Test

为剔除或检出有缺陷的产品或早期故障的产品而进行的试验或一组试验。

34. 可靠性特征量 Reliability Characteristic Quantity

可靠性特征量是用来表示产品总体可靠性高低的各种可靠性数量指标。

35. 可靠度 $R(t)$ Reliability

产品在规定的条件下和规定的时间区间 $(0, t)$ 内完成规定功能的概率。

36. 失效率 $\lambda(t)$ Failure Rate

工作到某时刻尚未失效的产品,在该时刻后单位时间内发生失效的概率。

37. 平均失效前时间 MTTF Mean Time To Failure

失效前时间的期望。

38. 平均故障间隔时间 MTBF Mean Time Between Failures

故障间工作时间的期望。

39. 可靠寿命 t_{R0} Reliability Life

给定的可靠度所对应的时间。

40. 总寿命 TL Total Life

在规定条件下, 产品从开始使用到规定报废的日历持续时间。

41. 启动次数 n Number of Starts

发电机组从静态升速到运行状态的过程为启动。发电机组在使用寿命内启动的总次数为启动次数。其计算式为

$$n = n_c + n_w + n_h + n_r \quad (1-1)$$

式中 n ——启动次数;

n_c ——冷态启动次数;

n_w ——温态启动次数;

n_h ——热态启动次数;

n_r ——极热态启动次数。

42. 易损件更换周期 RPFDP Replacement Period For Damageable Parts

不可修复的易损件更换的时间间隔。

43. 维修度 $M(t)$ Maintainability

在规定的条件下并按规定的程序和手段实施维修, 产品在规定的使用条件下和规定的时间区间 $(0, t)$ 内保持或恢复能执行规定功能的概率。

44. 平均修理时间 MRT Mean Repair Time

修理时间的期望。

45. 可用度的观测值 Observed Availability

在某个观察时期内, 电站锅炉或火电机组能工作时间对能工

作时间与不能工作时间之和的比。

46. 平均故障间隔时间的观测值 Observed Mean Time Between Failures

一台或多台电站锅炉或火电机组在它的使用寿命期内的某个观察期间累积工作时间与故障次数之比。

47. 平均修理时间的观测值 Observed Mean Repair Time
修复时间的总和与修理次数之比。

48. 可靠性工程 Reliability Engineering

为了达到产品的可靠性要求而进行的一套设计、研制、生产和试验等工作。

二、状态划分

电站锅炉或火电机组状态划分见图 1-1。



图 1-1 电站锅炉或火电机组的状态划分

三、状态术语

1. 停用停机 Deactivated Shutdown

火电机组经网(省)局批准封存停用或长期改造停用时,称该

机组处于停用停机状态。处于本状态的电站锅炉或火电机组不参加可靠性的统计评价。

2. 在使用 Active

火电机组处于要进行统计评价的状态。电站锅炉或火电机组的在使用状态包括可用状态和不可用状态。

3. 可用 Available

电站锅炉或火电机组处于能运行的状态，而不论其是否在运行。

4. 运行 In Service

火电机组处于电气连接到电力系统工作的状态。

5. 备用 Reserve Shutdown

电站锅炉或火电机组处于可用但又不在于运行的状态。

6. 不可用 Unavailable

电站锅炉或火电机组因故处于不能运行的状态。

7. 计划停运 Planned Outage

电站锅炉或火电机组处于计划检修(包括计划大修停运、计划小修停运和节日检修停运)的状态。

8. 计划大修停运 Planned Overhaul Outage

电站锅炉或火电机组按“检修导则”规定的大修检查间隔并经年度计划批准进行的大修停运，包括大修需要进行的试验。

9. 计划小修停运 Planned Minor Repairing Outage

电站锅炉或火电机组按“检修导则”规定的小修间隔并经月度计划批准进行的计划停运。

10. 节日检修停运 Holiday Repairing Outage

电站锅炉或火电机组按网(省)局批准的节日检修计划进行的计划停运。

11. 非计划停运 Unplanned Outage

电站锅炉或火电机组处于不可用而又不是计划停运的状态。

12. 强迫停运 Forced Outage

要求电站锅炉或火电机组在 72h 内从可用状态退出的一种停运。

13. 维护停运 Maintenance Outage

电站锅炉或火电机组可延迟至 72h 以后,但需在下次计划停运之前从可用状态退出或机组的计划停运超过预定期限的一种停运。

14. 启动 Starting Attempt

将一台电站锅炉或火电机组从停运转为运行状态的操作。启动程序重复开始几次而未进行任何消除缺陷的检修时,按一次启动计。

15. 启动成功 Starting Success

在规定期间内,将一台电站锅炉或火电机组从不可用状态或备用状态转为运行状态的一次成功的启动。规定期间随不同型号的电站锅炉或火电机组而有所不同。

16. 启动失败 Starting Failure

在规定期间内未能将一台电站锅炉或火电机组从不可用状态或备用状态转为运行状态的一次不成功的启动。规定期间随不同型号的电站锅炉或火电机组而有所不同。在规定的启动期间内重复失败,均按一次启动失败计。若经过继续努力使机组投入运行,但超过规定的期间,则这次启动即按一次启动失败计,多增加的启动时间按强迫停运计。

四、容量术语

1. 毛最大容量(GMC) Gross Maximum Capacity

一台电站锅炉或一台火电机组在某一给定期间内能够连续承载的最大容量。为确定这一容量,需要进行验证性试验。

2. 最大连续功率(MCR) Maximum Continuous Rating

在额定的新蒸汽参数、额定的再热蒸汽参数、规定的背压以及补给水率为零的条件下,不超过规定寿命时,发电机端子处的保证连续功率。该功率一般大于铭牌功率。汽轮机的调节阀不必