

发电设备

状态监测与寿命管理

FADIAN SHEBEI

ZHUANGTAI JIANCE YU SHOUMING GUANLI

西安热工研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

发电设备 状态监测与寿命管理

FADIAN SHEBEI

ZHUANGTAI JIANCE YU SHOUMING GUANLI

常州大学图书馆藏
西安热工研究院 编著
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以设备状态监测为基础,状态分析为主线,状态管理为目的,从概述、设备状态监测技术、超临界机组金属监督技术、状态评估与管理技术、风险评估与管理技术、寿命评估与管理技术六个方面,分别对发电设备状态监测与寿命管理技术进行了详尽阐述。本书不仅融入了状态监测领域的最新研究成果,还通过大量的实际案例,展示了发电设备状态监测与寿命管理的应用技术。

本书既可供从事电厂设备制造、运行、检修、管理等相关工作的技术人员阅读使用,也可供从事相关技术研究工作的技术、管理人员及高校师生借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电设备状态监测与寿命管理/西安热工研究院编著. —北京:中国电力出版社,2012.7

ISBN 978-7-5123-3286-7

I. ①发… II. ①西… III. ①发电设备-设备状态监测 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 157724 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 470 千字

印数 0001—3000 册 定价 58.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

《发电设备状态监测与寿命管理》

编 委 会

主 任 林伟杰

委 员 刘 伟 纪世东 王月明 汪德良 范长信

赵宗让 李耀君 柴华强 李志刚 康豫军

刘英雄 马剑民 李烨峰 李崇晟 张传虎

主 编 林伟杰

副主编 李耀君

参 编 李志刚 李崇晟 马剑民 康豫军 李烨峰

张传虎 孙 玺 王大鹏

前言

发电设备是发电厂一切经营活动的基础。近年来,随着国内超临界、超超临界机组的大量投运,发电设备逐渐向超大型化、全自动化方向发展,同时,发电设备运行风险也在增加:新机组的日常运行及维护特性与亚临界机组有明显差异,呈现出故障隐患多、停机损失大、维修费用高、维修周期长等新特点。

近年来,大机组频繁调峰、长周期运行等新运行方式的普遍化,对设备可靠性提出了苛刻要求。同时,经济效益是电厂的追求目标,客观上要求更加合理地安排检修周期与检修内容,压缩检修费用。为满足发电设备可靠性提高与检修费用减少的双重需求,迫切需要成熟完整的发电设备健康状况监测、评估与管理技术。

随着电力体制的改革,我国发电设备管理逐步向精细化管理方向发展,特别在近十年来取得了显著进步。国内一些行业研究机构持续开展了状态检修、优化检修相关技术研究,在状态检修(CBM)和设备健康管理(EHM)技术发展方面取得了系统性突破,研发出系列新的监测、评估、管理新模型与技术方法,并逐步探索出适用不同类型设备的具有中国特色的状态管理、风险管理、寿命管理三位一体的精细化管理模式。

本书以发电设备状态监测为基础、状态分析为主线、寿命管理为目的而组织编写。林伟杰担任主编,负责全书内容统筹工作,李耀君担任副主编。第一章由李耀君、李崇晟编写,论述了发电设备状态检修技术的意义,简要总结了目前发电机组检修周期的确定方式。第二章由李崇晟、李烨峰、李志刚、康豫军、张传虎编写,探讨了信息融合技术与预测技术在发电设备状态分析中的应用,详细介绍了油液、水汽质量对设备状态监测、评估与管理的主要影响,并专门介绍了管道支吊架、阀门等关键发电设备的状态监测技术。第三章由马剑民编写,针对目前超临界、超超临界大型机组技术监督涉及的一些新材料、新技术进行了阐述,并给出了全寿命周期管理概念下的金属监督主要内容。第四章由李耀君、李崇晟编写,提出了广义风险的概念,制定了基于机组级、系统级、设备级三个层面的状态评估策略和方法,介绍了汽轮机组的状态评估基本流程。第五章由李耀君、孙玺编写,论述了风险管理的基本方法,重点探讨了锅炉受热面的定性风险评估、定量风险评估和半定量风

险评估方法，提出了相关的锅炉高温设备的风险管理模式与建议。第六章由李耀君、王大鹏编写，论述了火电厂机组寿命管理的基本理论与方法，重点介绍了锅炉管、锅炉部件、汽轮机部件的寿命管理主要内容。柴华强承担了本书策划、组稿、协调及后期的统筹工作，刘英雄对稿件进行了初审。

本书展示了西安热工研究院在大型电站机组健康状态管理方面的最新研究成果与技术方法，也包含了西安热工研究院在发电设备状态监测与寿命管理技术领域的研究心得和宝贵的实践经验。全书内容新颖、材料丰富、覆盖面广、信息量大，对国内电力行业管理人员和专业技术人员、特别是关注发电设备管理技术的相关读者，了解发电设备状态监测与寿命管理技术具有重要的参考价值和工程应用价值。

本书在编写过程中，得到西安热工研究院电站优化检修及软件技术部以及其他专业部门的大力支持，中电联电站阀门标准化委员会专家张传虎也给予了大力支持，在此一并致谢。

本书将根据技术的发展不断扩充、修正和完善。限于作者水平，书中的疏漏与不足之处，欢迎读者不吝赐教。

编委会

2012年10月

目 录

前言

▶ 第一章 概述	1
第一节 发电设备状态监测技术发展	1
第二节 发电设备状态检修	5
第三节 依据风险评估确定检修周期	11
参考文献	13
▶ 第二章 设备状态监测技术	14
第一节 信息融合技术及应用	14
第二节 预测技术及应用	33
第三节 机组油液状态监测	42
第四节 机组水汽状态监测	54
第五节 管道支吊架状态及管道振动监测	78
第六节 安全阀状态监测	93
参考文献	103
▶ 第三章 超临界机组金属监督技术	106
第一节 超临界机组用新型耐热钢	106
第二节 超临界机组用新型耐热钢焊接技术	113
第三节 超临界机组金属监督	119
第四节 监督检验新技术	132
参考文献	144
▶ 第四章 状态评估与管理技术	145
第一节 机组级状态评估	145
第二节 系统级状态评估	154
第三节 RCM 状态评估技术	163
第四节 设备状态信息管理系统	176
参考文献	181

▶▶ 第五章 风险评估与管理技术	182
第一节 风险评估基本方法	182
第二节 全厂设备定性风险评估	187
第三节 锅炉受热面风险评估技术	196
参考文献	221
▶▶ 第六章 寿命评估与管理技术	223
第一节 总则	223
第二节 寿命评估	228
第三节 锅炉管寿命管理	261
第四节 锅炉部件寿命管理	283
第五节 汽轮机寿命管理	294
参考文献	307

概 述

第一节 发电设备状态监测技术发展

随着近年来国内超（超）临界机组的大量投运，发电设备逐渐向超大型化、全自动化方向发展，引领世界发电技术潮流，同时由之引出的设备运行风险也在增加，新机组的日常运行与维护特性有明显差异，出现故障隐患多、停机损失大、维修费用高、维修周期长等新特点。

近年来机组频繁调峰、长周期运行等新运行方式的普遍化，对设备可靠性提出苛刻要求。与此同时，为追求电厂经济效益最大化，客观上要求进一步合理安排检修周期与检修内容，压缩检修费用。要实现可靠性提高与检修费用减少的双向需求，则迫切需要完整成熟的设备健康状况监测与评估技术才能满足。

电厂设备的使用健康状况直接关系到机组运行的可靠性与经济性，只有在设备处于最佳状态下才能发挥出优良的使用性能，也才能够达到最佳的节能降耗效果。

电厂设备状态管理技术发展由来已久，并越来越得到重视，近 10 年来，国内外机组状态监测逐渐向状态检修（CBM）和设备健康管理（EHM）方向发展，成为电厂技术发展的主流方向之一。

简单地讲，设备健康管理的四个要素包括：

- （1）设备关键部位或参数的定量监测（何地）。
- （2）异常状态与初始事故隐患的及时确认（何时）。
- （3）相应的效果最佳的维修活动确定（做什么）。
- （4）维修过程合理控制与管理（怎么做）。

随着电力体制的改革，我国电厂设备管理现代化也逐步向精细化管理方向发展，近 10 年来取得显著进展，西安热工研究院在持续开展状态检修、优化检修研究的过程中，在状态检修（CBM）和设备健康管理（EHM）技术发展方面取得了系统性突破，开发了一系列新的监测、评估、管理新模型与技术方法，推荐的重要设备分类原则为高温关键设备、关键设备、重要设备三类。推荐的先进管理思想为：设备健康管理的核心是科学合理的实现机组设备的状态管理、风险管理、寿命管理三个管理。推荐的优化管理模式为高温关键设备采用状态管理+风险管理+寿命管理的基本模式。关键设备采用状态管理+风险管理的基本模式。重要设备采用状态管理的基本模式。

健康状态管理技术的发展特点及趋势可概括为以下四个方面：

1. 状态监测系统化
- （1）大量增加和发展在线、离线状态监测技术。

(2) 部件状态检验和检修活动的定时、定量、标准化, 维修决策支持功能的效益体现在延长设备寿命, 减少维修费用方面。

(3) 维修决策支持是在状态监测与实际维修工作之间的桥梁, 确定异常状态, 预测状态恶化到破坏性故障的时间后, 推荐最适合的维修活动, 然后由电厂自己确认并执行。

(4) 状态监测信息的分散式集中管理, 电厂建立数据平台, 为上一级提供关键数据, 如在线 SIS 实时监控信息系统, 离线 BFS++。

2. 诊断系统集成化

(1) 应用人工智能技术, 集中专家知识和思想方法, 开发高级专家诊断系统。

(2) 核心是开发设备故障知识库, 主要包括失效或故障模式, 失效或故障对应的状态特征量, 状态特征量的监测、检测方法, 状态特征量的阈值确定及特征量之间的逻辑关系, 需要集成的技术监督数据及各级报警定值, 设备故障对系统和机组的影响程度, 可靠性指标、节能环保指标及寿命指标阈值的确定, 状态指数确定等。

(3) 支持 RCM (以可靠性为基础的维修)、RBM (风险维修) 维修分析, 将评估诊断结果转化为维修行动。

3. 远程诊断实用化

(1) 利用研究院专门人员、专业监测设备和手段、专家经验优势, 满足多家电厂设备技术管理需求, 建立高效、专业、反应迅速的专门性中心。

(2) 提供动态状态统计, 趋势预测, 每周专家状态分析发布, 实时技术交流与互动功能。

4. 信息管理一体化

多层次、集团化管理系统应包括以下六个基本功能, 其中失效风险预测与寿命预测两个功能最为关键。

(1) 关键数据集成。

(2) 实时状态评估。

(3) 失效风险预测。

(4) 寿命预测。

(5) 设备状态专家分析。

(6) 维修决策支持与管理。

一、状态监测原理

由外界工作条件和内在机械因素共同作用下产生的设备内部综合特征, 称为设备技术状态。反映火力发电厂机组或设备状态的参数是多种多样的, 常用的有温度、压力、流量、液位、转速、振动等可以直接测量的物理量, 还有效率、扬程、轴功率、有效功率、焓降、热耗、煤耗等通过间接计算获得的参数。这些参数从不同侧面反映了机组或设备的状态^[1,2]。

电厂设备机械状态监控的关键点是监控以下三个关键节点:

(1) 原始状态。

(2) 正常状态。

(3) 故障状态。

原始状态既设备投运前初始状态, 包括设计状态 (如参数), 制造状态 (如材料原始强

度), 安装、调试状态等。也可以用一系列特性指标代表, 如设备的设计能耗指标、精度指标和材料强度指标等固有特性指标, 设备原始技术状态特征参数等。状态变化关键节点的示意图见图 1-1。

从全寿命周期管理的角度划分, 设备寿命初期(第一阶段)主要工作重点为原始状态的评估与管理, 而设备寿命中期(第二阶段)主要工作重点为使用状态的评估与管理; 设备寿命末期(第三阶段)主要工作重点为故障状态的预防评估与管理。

在外在条件和内在因素均处于理想时, 机械可正常发挥其规定功能的状态, 称为正常状态。机械是否处于正常状态的关键是内在因素, 内在因素的变化导致设备状态的趋势性变化, 典型的如高温设备材料的老化带来的设备强度逐渐下降。了解其变化规律是日常状态监测和分析的根本目的。通常的机械设备状态监测与分析流程如图 1-2 所示。

在外在条件和内在因素的不理想组合下, 机械不可能或不应该再发挥其规定功能的状态, 称为故障状态。分析故障状态的基本流程如图 1-3 所示。

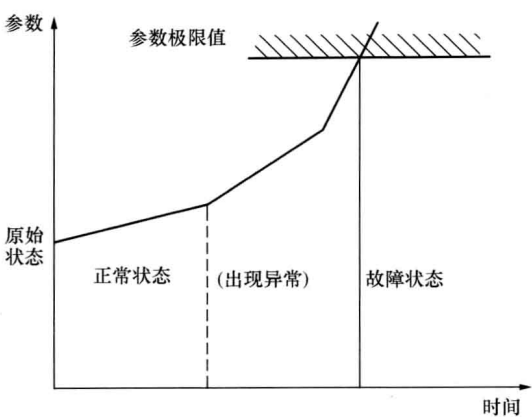


图 1-1 状态变化关键节点的示意图

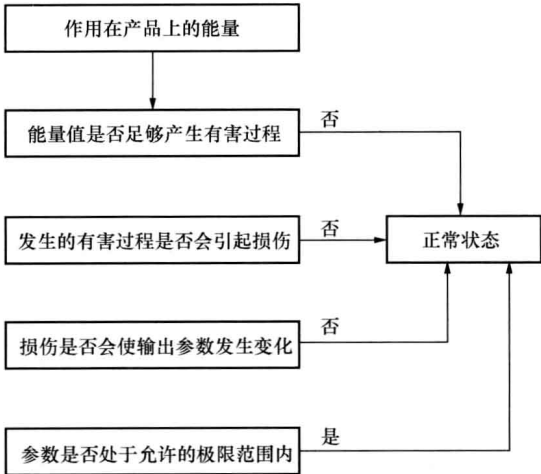


图 1-2 状态监测与分析流程

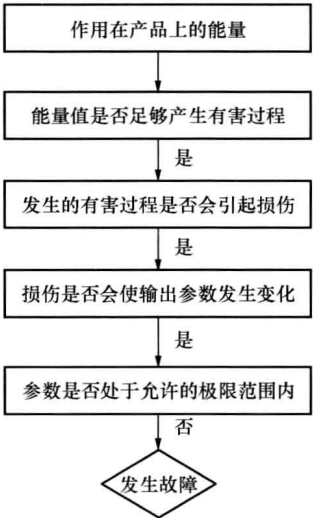


图 1-3 故障状态分析的基本流程

在电力工业现场, 使用了大量的机械设备, 主要包括回转机械和往复机械, 其中许多关键设备功率大、负载重且不稳定、工况较恶劣, 必须采取措施保证机械设备的正常运行并对其进行科学的维护。显然, 针对复杂的电厂机组设备, 单从某一方面去分析机组或设备的状态犹如盲人摸象, 不能反映出整体的情况, 因此, 我们考虑使用信息融合技术, 试着分析机组或设备全面的、综合的状态。

当前, 电力工业生产越来越注重降低成本、提高效率, 特别是要求在能避免机械设备发生事故的同时, 尽量延长设备运行周期。为此, 迫切需要提供能及时预测设备状态发展和变

化的趋势预示技术。

二、技术监督与状态监测

技术监督技术体系可以看做是真正中国特色的状态监测与状态管理模式，其产生与发展有其特定的背景。在计划检修年代，大多数电厂采用国产小机组设备，且其设计可靠性和制造质量不过关，有必要进行强制性的定期详细检查与统一管理。应该说，技术监督体系的建立与运行，分专业的设备状态定期检验与评定，给查找重大安全隐患，防止事故发生、保障经济运行以及提高电能质量、实现安全文明建设提供了有效的技术手段。近年来随着我国电力体制改革的深入和电力工业技术的不断发展，高效率、高参数、大容量和新技术机组所占比例的不断提高，“厂网分开、竞价上网”的电力市场机制日趋完善，对火力发电厂技术监督工作提出了越来越高的要求。

电厂技术监督包括热工、绝缘、继电保护、电气、电能质量、化学、金属、节能、环保、锅炉及压力容器安全等 10 项专业性监督工作（其他包括汽机监督、励磁监督），几十年的发展，已形成一整套涉及组织机构、管理制度、技术标准、年度监督工作计划、年度监督工作目标、实验室仪器设备、工作人员、监督会议纪要等细节工作的管理体系。技术监督管理已成为中国电厂设备管理、技术管理的主要内容。

典型的技术监督为三级管理体系，第一级为省电力技术监督领导小组及电力技术监督检测中心（政府授权的电力技术监督执行机构）；第二级为省内各发电公司；第三级为各发电企业。各发电企业还建立了由主管生产厂长或总工程师负责，技术监督专职工程师专责和基层专业人员协助的三级技术监督网络和各级监督岗位责任制，建立严格的月报、考核、闭环控制制度，将技术监督的工作和具体任务、指标落实到有关部门和岗位。

电厂技术监督工作执行部颁《电力工业技术监督规定》等一系列国家、行业、集团、企业技术监督的方针、政策、法规、标准、制度条例，并按年度制订本单位的金属技术监督工作计划、工作目标、实施细则和有关措施。

为了落实设备状态的全过程监督控制，电厂按照专业设置了专门的试验室，配备有资质的专业人员和各种精密仪器进行定期监督检查，这些检查、监督管理的内容涉及设备状态的所有主要内容，因而，当之无愧地成为中国特色的全机组、全过程、全寿命周期、全专业的状态监测、评估、管理体系，是典型的中国特色状态检修模式。

在新的电力工业体制下，如何进一步规范技术监督工作、提高电厂监督工作的质量和水平、增强监督工作的符合性和有效性，带来新的挑战。随着电厂设备设计和制造水平的提高，设备可靠性得到显著改善；电厂运行与检修水平也明显提高，明显降低了设备事故率；电厂体制的变化、设备点检定修、状态检修管理的兴起，将以往的强制性监督标准改为推荐性监督标准，均对传统的技术监督体系带来影响；以往的监督体系越来越重管理报表，轻技术支持，流于形式，带来反思。

随着在线监测、专家诊断、集团化管理等技术管理方式的变化，以及状态评估、风险管理、寿命管理等技术的发展，如何进一步发挥技术监督在技术涉及全面，管理体系规范，管理效果显著等优点；而避免和改善定量化评价技术支撑少，动态监控技术弱，缺少现代信息化管理等缺点；特别是将传统技术监督方式与先进状态检修模式相融合，进一步探索中国特色状态检修技术发展的路线方面，具有重要意义。

如何保持现有主要设备的运行可靠性、安全性,有效预防和减少事故率,同时保持和提高生产的经济性、环保性指标,始终是发展和实施技术监督技术的主要目的。因此在新的时期,探索技术监督方式与状态检修模式相融合,电厂技术监督工作的主要内容应该是实现状态监测、状态评估、状态管理的一体化融合,通过采用一系列新的监测技术和手段,实现设备实时监测和检验的目标管理、实现设备当前状态的在线评估和风险管理、实现设备长期老化趋势分析和寿命管理,并最终提高电厂设备运行的安全性、可靠性、经济性和环保性。

第二节 发电设备状态检修

状态检修是一种新的检修模式,它以设备当前的实际工作状况为依据,而非传统的以设备使用时间为依据规划检修,即通过先进的状态监测手段、设备特性评价手段以及寿命预测手段,判断设备的状态,识别故障的早期征兆,对故障部位及其严重程度、故障发展趋势作出判断,并根据分析诊断结果在设备性能下降到一定程度或故障将要发生之前进行维修。由于科学地提高了设备的可用率和明确了检修目标,这种检修体制消耗费用最低,它为设备安全、稳定、长周期、全性能、优质运行提供了可取的技术和管理保障。

状态检修随着维修管理水平的提高和故障诊断技术的发展而逐渐进入实用化,给企业带来的收益超过预防性定期检修和传统的主动维修,因此,在世界范围内引起了广泛的重视,理论研究和生产实践都在不断深入,有的已取得了丰硕成果。在电力行业推广状态检修,其经济效益和社会效益都将是巨大的,所以最新的有关状态检修的技术和管理思想在电力行业中都有应用,大量从事故障诊断和维修管理的公司也在努力进入电力生产领域。

在发电设备上完全依靠和实施预知性维修,目前是难以实现的。经过研究和实践,电力行业普遍认可的、包含预知维修成分在内的发电设备状态检修方式是一种综合或复合的检修方式,在国外有时称为发电设备优化检修模式,在国内则称状态检修。状态检修是传统计划预修制的重大发展。

虽然,由于故障监测技术和故障诊断水平的相对滞后,发电厂的锅炉、汽轮机等主设备完全实施状态检修还需要进行深入研究和完成大量、细致的工作。但是,状态检修技术现已成为电力工业的前沿技术、关键技术和实用技术,国内外电厂主设备检修技术的发展趋势之一是实行状态检修。

目前,在电厂推行状态检修所要达到的基本目标是:延长定期检修间隔、减少检修时间、提高设备可靠性和可用系数(可用率)、增加发电量、延长设备寿命、降低运行检修费用、改善电厂运行性能、提高企业经济效益。

在我国推行发电设备状态检修在很大程度上还受到电力企业管理体制的影响。在电力生产计划经济管理体制下,企业的检修费用、设备更新费用等都由上级统一包干,因此企业不会主动花力气推行状态检修。发电设备状态检修的目的是优化检修、节省费用、降低发电成本等,部分集团和电厂都是靠高投入提高设备的可靠性,但高投入造成高发电成本和低效益,与状态检修的初衷和节能减排理念相悖。如果依靠上级的命令自上而下推行状态检修,既不可能做到也不现实。

随着我国电力工业体制改革的推行,发电厂成为自主经营、自负盈亏的主体,在竞价上

网等市场机制的刺激下,企业从自身发展的需要出发,为提高经济效益、降低生产成本、在竞争中立于不败之地,越来越关注于自己的生产管理和成本控制,开始主动积极地推行状态检修,以获得更强的竞争力。为了在新的电力工业体制及新的技术条件下,在保证和提高机组的安全性、可靠性的同时,减少机组检修成本、建设节约环保型企业,各发电集团和发电厂根据自身实际情况,在借鉴国外经验的基础上,广泛采用先进的监测和检测手段,探索和施行了各种各样新的检修策略,其中主要有: 预知性维修 (PdM), 风险维修 (RBM), 以可靠性为基础的维修 (RCM), 点检定修 (TPM), 寿命管理 (LM), 状态检修 (CBM) 等多种检修模式和检修策略。在不断探索中逐步形成以风险为基础的维修、预知性维修和以寿命评估为基础的维修理念和方法, 成为中国电厂状态检修的技术基础和优化模式, 计划检修的周期优化也是建立在此基础上的一种状态检修模式。

如神华集团曾在绥中、神木两个发电厂实施了 RBM 试点, 在北京热电厂实施了 SRCM 试点, 并在全集团推行点检定修 (TPM) 等管理体制; 华能集团在状态检修的技术研发方面投入了大笔经费, 在状态监测、故障诊断、寿命预测、风险评估方面取得了技术突破。

设备检修体制是随着生产力的发展、科学技术的进步而不断演变的。它在很大程度上反映出生产力发展水平和技术管理水平的高低。在设备检修体制演变的过程中, 根据不同的行业特点、不同的设备管理要求, 出现了各种追求不同具体目标的检修方式。但就检修体制而言, 归纳起来有事后维修、预防性定期检修、状态检修和改进性检修四种。这四种检修体制并不是互相排斥的, 在不同的管理要求下, 它们是可以共存的。由于相关文献众多, 这四种检修体制的意义和解释这里不再赘述。

国内外在现行检修体制下根据各自的国情, 采用的设备检修方式呈现出多样化的格局, 每种检修体制都包含有多种检修方式, 而有一些检修方式又跨越了不止一种检修体制。

苏联的检修体制以计划预修制为主, 其中主要的检修方式为检查后修理、标准修理和定期修理三种, 强调以技术维护为主、检修规范化以及检修的集中化和专业化。

美国普遍推行的检修体制是以生产为中心、为生产服务的生产检修体制, 包括检修预防、事后维修、改进检修、预防检修、预知维修。在上述维修方式的基础上, 现正在逐步推行预知维修, 且与其他维修方式进行融合。

日本从 20 世纪 70 年代初至今主要推行全员生产维修体制 (TPM)。TPM 有丰富的理论基础, 是各种现代管理方法在企业生产中的综合应用, 具有鲜明的日本管理特色。

英国在设备综合工程学的指导下, 强调设备综合管理, 把检修融入设备整个寿命周期管理中, 根据全寿命费用优化的原则安排采用合适的检修方式。

德国的检修体系可分为集约型和粗放型, 就是根据设备重要程度不同分别采取预防性维修和事后维修。

瑞典的企业从设备管理的角度综合采用事后维修、预防检修和状态检修, 检修已经从过去单纯追求技术效果发展到以经济指标为中心。

法国的检修体制以预防检修为主, 并使定期检修尽量和状态检修结合。

意大利、瑞士等国也都从设备综合管理的角度来组织设备检修, 采用的检修方式也都是综合的方式, 以追求设备可靠性、可用率以及运行检修费用最小为核心。

1949 年以来, 在学习苏联经验的基础上, 长期实行的检修体制是以事后维修、预防性

计划检修为主的检修体制。以故障维修、预防性计划检修为主的检修体制曾经是适应我国生产力发展水平的检修体制，它一般包括大修、小修、临修、定期维护等形式。在发电设备管理中，采用这种检修方式的优点在于可保持供电的基本稳定性和人力、物力、资金安排的计划性，生产指挥者基本上做到心中有数。在这种检修体制下，大修间隔为2~3年，小修间隔为4~8个月，检修项目、工期安排和检修周期均由管理部门根据经验制订。但随着发电设备向高参数、大容量、复杂化发展，其安全经济运行对社会的影响也越来越大，致使检修投入大幅度上升。面对这个情况，该检修体制日益明显暴露出其缺陷，因此对设备实行更先进、更科学的管理和检修体制，无论从发电厂自身的利益还是从社会的要求出发，都势在必行。

由于传统的检修体制存在明显缺陷，一些发达国家已开始进行基于设备状态评价的状态检修。这种维修体制是建立在管理方式和科学技术进步，尤其是监测和诊断技术发展基础之上的。它应用状态监测和故障诊断等技术获取信息，在故障将要发生之前或继续运行已很不经济时，有目的地进行适当和必要的维修。

随着工业生产的长足发展和科学技术的突飞猛进，发电设备容量增大、参数提高的同时，可靠性设计与制造水平也明显提高。在这种新形势下继续沿用以往的维修模式按上级管理部门的规定安排生产，已经表现出明显的不足和欠缺，造成大范围的设备过修，结果导致了资源浪费和机组可用率的降低。

目前，在优化检修技术发展方面，国内外的科研成果主要集中在设备状态评估技术上，依据设备状态监测的结果开展状态评估大多可以完成，但下一步将评估结果落实到检修内容、方式、周期的调整与优化方面，还没有形成一个具体的规程或者对状态检修缺乏指导性建议，即如何将状态评估结果转化为状态管理行动。检修周期的确定主要还是来自经验和检修规程的规定，缺乏完整的理论、策略和方法的指导，这极大地限制了状态检修工作的进一步发展。

一、机组检修周期

关于机组的检修周期，除了人们常说的正常运行机组的检修周期以外，还包括很重要的一类——新投产机组的第一次检修时间。近几年，新机组投产后的第一次检修时间开始引起发电集团和电厂的重视。

在欧美，检修周期没有明确的法律规定，检修周期的制订一般依据制造厂提出的要求执行，可以根据具体情况适当延长，但为避免延长检修周期的风险，一般电力公司为减低风险都会购买保险。

日本经济产业省 NISA (nuclear and industrial safety agency) 的通告中明示了企业定期检查方法示例以及延长企业定期检查时期的检查示例 (汽轮机在不超过 4 年的时间，开始检查；锅炉及压力容器在不超过 2 年的时间里，开始检查)。

国内通常将 1 年后的第一次检修称为检查性大修，因 DL/T 838—2003《发电企业设备检修导则》为非强制性标准，因此，允许根据实际情况确定检修时机。一般参考制造厂给定的检修周期进行检修；如果制造厂未给定，第一次检修可以是 A 修也可以是 B 修，即检修内容根据实际确定。

国内新机组习惯上在投产 1 年后进行检查性大修，其原因如下：

(1) 以往大多数电厂采用国产小机组设备, 且其设计可靠性和制造质量不过关, 有必要在投运一段时间后进行详细检查, 以便查找重大安全隐患, 防止事故发生。

(2) 以往采用国产小机组设备, 在设备的安装、调试时期, 为了保证建设和调试进度, 安装和调试遗留下各种各样的问题, 机组运行状况不佳, 有必要在投运一段时间后进行详细检查, 以便改进重大隐患, 防止事故发生。

(3) 由于制造质量不过关, 国产大型汽缸的铸件变形一直是一个严重问题, 为了为变形留出裕度, 调试时一般将汽封间隙放大, 以便一次性通过 168h 负荷试验, 保证一段时间内的运行安全性。

(4) 由于汽封间隙放大, 将直接导致机组煤耗的升高, 影响经济运行, 有必要在一段时间后进行调整, 改进运行经济性。

通过引进开发, 近 20 年来我国机组可靠性设计水平有很大提高, 制造质量也稳步提升, 运行、检修水平也不断改进, 发电机组整体水平已处于世界前列, 国内第一次检修时间推迟的事例不断增多。

根据可靠性理论的浴盆曲线模型设备在投产初期往往是设备故障的高发期。实际上, 调查表明符合浴盆曲线理论的设备仅仅是一小部分, 实际中, 如果设计、制造质量提高, 建设期质量控制良好, 一年后很多设备已经进入了平稳运行期, 已没有早期检修的必要性。

参照发达国家的成功经验, 如果设计、制造质量提高, 建设期质量控制良好, 机组不需要安排检查性大修, 且检修周期明显延长。如上海汽轮机厂从德国西门子公司引进的超超临界汽轮机明确规定揭缸大修时机为 12 年 (华能玉环电厂), 其他类型大型机组一般可视情况来确定首次大修时机。因此, 开展机组及设备状态评估, 依照机组设备状态评估结果来确定首次大修时机及长期运行后的检修周期是完全可行的。

在电厂主机中, 汽轮机的检修涉及揭缸、抽转子等项目, 一旦揭缸, 则至少需要 40 天的时间, 检修需要时间长、而检修频率较低, 是决定计划检修的关键因素。锅炉的检修周期相对较短、但检修频率高, 锅炉一般不需要大修, 如果没有整个部件的更换 (如全部更换过热器或再热器等部件), 一般的检查、换管在小修中即可完成, 即使锅炉的爆管抢修一般仅 3~5 天即可完成, 锅炉的检修周期影响的是机组的小修周期或检查间隔。锅炉检修周期主要由高温受热面的剩余寿命或者失效风险计算来确定。

汽轮机检修周期的确定则可主要基于设备的 RCM 分析、RBM 分析和经济性分析理论, 评估汽轮机当前的可靠性、安全性、经济性、环保性状态特性来完成。具体实现可综合采用的方法有按等效运行小时数 (寿命) 确定大修间隔; 按机组运行可靠性指标确定大修间隔; 按机组热经济性确定大修间隔。汽轮机本体状态分析的最大难度在于状态监视测点难于布置、在线监测技术滞后。所以, 汽轮机如果不揭缸的话其内部几何参数的变化无法得知, 仅从汽轮机性能参数的变化虽然可以定性地分析它的运行状态和故障趋势, 但是由于汽轮机结构的复杂性和故障的随机性, 要明确汽轮机发生故障的具体位置和原因以及定量给出汽轮机的未来无故障运行时间, 则是当前技术难以实现的。因此, 汽轮机合理检修周期的确定通常采用半定量分析为主、定量计算为辅的思路和策略, 力求尽量全面系统地掌握设备状况, 发现故障隐患, 综合分析评价后提出建议。

二、相关标准与规定

早期制定的 (SD 230—1987)《发电厂检修规程》中规定,燃煤机组(机、炉、电)大修间隔为 3 年,小修间隔为 4~8 个月。我国目前在役发电机组组成有国产机组、进口机组、引进技术国内制造机组,制造水平有 20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代末、最近 10 年的,机组投入运行的时间有长有短,检修维护和运行管理水平各有差异,因此,所有机组采用统一的维修模式和检修周期显然有欠合理。从 1999 年至今,我国已有多家电厂利用国外优化检修(如美国 EPRI)的技术,对电厂或者机组的子系统进行了以可靠性为中心的维修(RCM)、以风险为基础的维修(RBM)等分析评估,在此基础上大多将机组的大修周期从 4 年改为 5~6 年,目前,已经正常实现了 6 年大修安全运行周期。同时,出现了华能大连电厂和浙能嘉兴电厂机组连续运行 700 多天的记录。

新的 (DL/T 838—2003)《发电企业设备检修导则》代替了 (SD 230—1987)《发电厂检修规程》,其中在机组检修周期方面作出了新的规定,其中第 6.1.4 条规定:新机组第一次 A/B 级检修可根据制造厂要求、合同规定以及机组的具体情况决定。若制造厂无明确规定,一般安排在正式投产后 1 年左右。但主变压器第一次 A 级检修可根据试验结果确定,一般为投产后 5 年左右。进口汽轮发电机组大修间隔为 6~8 年,国产汽轮发电机组大修周期为 4~6 年。该定期检修的建议实际也是从设备失效结果、事故分析、风险分析、寿命评估历史中归纳整理出来的,我们后面提到的对设备进行收集资料、评估状态的思路与其基本一致。

锅炉制造厂在说明书中对各部分受热面都有详细的质量保证和寿命规定,通常高温受热面的寿命一般为 10 万 h,低温受热面的寿命一般为 30 年。

汽轮机制造厂的规定中,涉及的主要是新机组汽轮机主汽阀的蒸汽滤网的拆除时间,一般要求机组在运行不超过 8 个月的期间内应拆下该滤网,这影响到新机组第一次大修时间的确定。

随着设备制造水平的上升和机组可靠性的增加,汽轮机组的大修间隔也得到延长。例如,上海汽轮机厂从德国西门子公司引进的单轴、HMN 积木块系列的四缸四排汽超超临界机型(为华能玉环电厂设计制造超超临界 1000MW 汽轮机),明确规定其机组检修间隔为有效运行时间 9.6 万 h(约 10~12 年),大大提高了汽轮机本体的运行和维护经济性。

机组检修周期调整的原则是在不与国家有关法律、法规、国家标准、行业标准、集团标准相抵触的情况下,合理、适当地对机组检修周期进行优化。

检修周期调整时涉及的主要强制检验、试验或调整的项目规定,如表 1-1 所示。

表 1-1 部分强制检验、试验或调整的项目规定

序号	项目名称	项目制约检修周期调整的说明	出处(或依据)	专业
1	锅炉安全阀校验	校验超期(每年一次)	蒸汽锅炉安全技术监察规程	金属
2	压力容器安全阀校验	校验超期(每年一次)	TSG R0003—2007《简单压力容器安全技术监察规程》和 TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》	金属