水由厂发电机组优化检修策略研究

刘定友　编著

黄河水利出版社

水电厂发电机组优化检修策略研究

刘定友　编著

常州大学图书馆
藏书章

黄河水利出版社
·郑州·

图书在版编目(CIP)数据

水电厂发电机组优化检修策略研究/刘定友编著. —郑州:黄河水利出版社,2014.5
ISBN 978-7-5509-0801-7

Ⅰ.①水… Ⅱ.①刘… Ⅲ.①水力发电站-发电机组-检修-研究Ⅳ.①TV734.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 097223 号

出 版 社:黄河水利出版社
地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003
发行单位:黄河水利出版社
发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)
E-mail:hhslcbs@126.com
承印单位:黄河水利委员会印刷厂
开本:787 mm×1 092 mm 1/16
印张:5.125
字数:148 千字 印数:1—1000
版次:2014 年 5 月第 1 版 印次:2014 年 5 月第 1 次印刷

定价:19.00 元

序　言

电力市场环境下，厂网分开，各水电厂商成为独立的经济实体，其包括检修在内的机组运行策略是以其效益最大化为目标安排的。传统的定期检修模式，虽在一定程度上保证了机组安全运行，但可能造成过维修或欠维修；而基于机组运行状态测量与诊断的状态检修模式，虽然根据其元部件的运行状况确定了机组的检修方案，提高了运行可靠性，但并未考虑市场电价因素影响，不符合电力工业市场化改革的需求。本书在介绍设备检修有关基础知识的基础上，结合计划检修和状态检修模式，提出了市场环境下基于水电机组监测状态的优化检修策略，保证了水电厂商的效益最优和机组的可靠运行。

首先，基于故障树方法对水电机组的故障模式进行分析，确定导致其故障的最小割集，即得到待监测的元件，从而确定相关监测设备及安装地点。根据监测设备在每一个时段所得的机组的运行参数，确定其运行状态。基于此，判断各机组是否需要检修维护，即是否能继续可靠运行，若需要检修则立即停运、维护该机组，若不需要则根据所得的运行参数，采用故障树和最小割集方法估计各机组停机风险系数，该系数将用于该时段的机组检修规划模型中。

其次，对于可继续运行的机组来说，根据其停机风险系数，考虑市场电价后，分析其检修/故障停运后各时段内水电厂商的成本/效益水平，包括目前市场的售电效益、机组故障所引起的风险损失和检修成本，并以规划期的经济效益最优确定机组检修安排，根据该模型特点，采用遗传算法和线性规划方法相结合的方法进行求解。

上述两步骤中，前者隶属于状态检修思想，后者隶属于考虑了机组运行状态的规划检修模块。与传统规划模型只须经一次计算不同，该优化检修策略采用迭代规划思想，在每个时段均根据其状态监测情况分别进行状态检修判断和规划检修判断，从而保证所得检修计划既能

确保水电厂商机组可靠运行，又考虑了市场电价影响，在售电效益和相关成本之间取得了均衡。最后，以小浪底水力发电厂6台机组在一年内的检修安排为例，说明了本书所提优化检修模型的有效性和可行性。

本书涉及的领域正在不断发展，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编著者

2014年3月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

序　言 …… (1)
第1章　概 述 …… (1)
1.1　发电设备检修体制的演变 …… (1)
1.2　发电设备状态检修 …… (29)
第2章　发电设备状态检修的实施 …… (44)
2.1　实施方案 …… (44)
2.2　实施步骤 …… (50)
2.3　支持系统 …… (52)
第3章　发电设备状态检修管理 …… (54)
3.1　基本原则 …… (54)
3.2　基础管理 …… (55)
3.3　技术组织 …… (71)
3.4　发电设备状态检修管理 …… (76)
第4章　发电设备状态的监测方法和故障诊断方法 …… (88)
4.1　发电设备状态的监测 …… (88)
4.2　故障诊断方法 …… (92)
4.3　发电设备故障诊断 …… (97)
第5章　发电设备检修规划模型 …… (100)
5.1　传统环境下机组检修规划模型 …… (100)
5.2　市场环境下发电厂商的检修策略 …… (102)
第6章　水电机组状态检修分析 …… (106)
6.1　水电机组监测对象的确定 …… (106)
6.2　机组状态检修所需的关键技术 …… (113)
6.3　机组故障分析 …… (120)

第 7 章　市场环境下水电机组优化检修模型 …… (124)
7.1　水电机组优化检修策略 …… (125)
7.2　水电机组检修规划模型 …… (127)
第 8 章　优化检修策略的应用 …… (140)
8.1　状态监测系统 …… (140)
8.2　小浪底水电机组优化检修规划应用 …… (144)
附　录 …… (151)
参考文献 …… (155)

第1章 概 述

1.1 发电设备检修体制的演变

1.1.1 设备检修体制的演变

随着生产力的发展、科学技术的进步，设备检修体制伴随产业革命不断演变。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。工业发展从手工作坊到机械化再到电气化，各个时期的设备管理与检修方式发生了很大变化，总体而言，可分为四个阶段。第一个阶段是第一次产业革命时期，对设备实行事后维修，运行人员同时又是检修人员。第二个阶段是第二次产业革命时期，开始实行预防性计划检修，检修人员从生产中逐步分离出来，形成相对独立的专业工种，专业性的检修队伍逐渐形成。第三个阶段是第三次产业革命时期，以经济效益为中心的检修理念逐步推行，围绕设备寿命周期费用的研究逐步在设备管理中得到应用。第四个阶段是第四次产业革命时期，随着设备状态监测和故障诊断技术的推广，基于设备状态的检修开始盛行。设备检修方式的演变过程见表1-1 。

表1-1 设备检修方式的演变过程

检修方式	时间	产业革命	生产状况	设备管理情况	国内设备管理情况
事后维修	18世纪	1760年第一次产业革命(以蒸汽机为代表)	手工业生产方式进入大规模工业化生产阶段	有了动力设备，开始有保养维修工作。一般运行人员兼顾维修并凭经验进行。对设备进行事后维修，坏了就修，不坏不修。属于传统经验管理，是早期设备管理的一种主要形式	国内的工业发展基本上是空白，设备维护和维修是简单的事后维修

续表 1-1

检修方式	时间	产业革命	生产状况	设备管理情况	国内设备管理情况
预防检修	19 世纪到 20 世纪 30 年代	1870 年第二次产业革命(以电力应用为代表)	开始实行电气化，重工业体系逐渐建立，有了流水生产线，商品大量成批生产	管理工作专业化，借助事先制定的科学程序和标准对工业生产分配过程进行控制和调节，用经济的方法来维持生产秩序和管理，在工业设备维修和管理中逐步推行预防性的定期检修制度	国内开始有了民族工业的萌芽，在设备的管理和维修方面基本上学习当时西方国家的方式
经济检修	20 世纪 40 年代到 80 年代	1942 年至 1980 年，第三次产业革命(以原子能、空间技术、电子计算机技术为代表)	建立了以先进的科学技术和生产高度社会化为特征的现代工业。新兴工业和企业在国民经济中占有越来越高的比重，设备管理人员比重逐步增加	进入现代化管理阶段。开始有了设备寿命周期评价，产生了设备综合工程学、维修工程学等学科，维修组织向集中化发展。对设备实行检修的手段有预防检修、改进检修、检修预防等，对不重要的设备采用事后维修	国内从 20 世纪 50 年代开始，学习苏联实行统一的预防性计划检修制度，以后在总结实践经验的基础上，逐步形成一种预防性的定期保养和计划检修制度
状态检修	20 世纪 80 年代至今	第四次产业革命(以信息技术的快速发展为代表)	生产向集约化发展，实现高度自动化和信息化，并向智能化大系统管理和控制自动化发展，电子计算机广泛应用并向巨型、微型、网络、智能方向发展	科学技术领域同时向着分化和综合方向发展，设备事故影响重大，因此对设备管理不仅有各种理论作为指导，而且有监测和诊断的科学技术手段作为基础对设备进行状态检修。设备管理也向着社会化、专业化、国际化发展。出现了运行人员参与检修的趋势	在总结国内几十年来设备管理经验的同时，借鉴国外现代设备管理方面的先进经验，确定应用诊断技术进行状态检修为设备检修的发展方向，进行广泛的试点总结和推广，为探索有中国特色的现代化设备管理进行尝试

在检修体制演变的过程中，出现了各种追求不同具体目标的检修方式。由于行业的差异、设备管理要求的不同，检修方式也是千差万别。但从检修体制的角度分析，总体而言有四种检修体制，即事后维修、预防性计划检修、改进性检修和状态检修，如图 1-1 所示。这四种检修体制虽有所差异，但并不矛盾，也不是孤立存在的，基于不同的时期和不同的管理要求，它们是可以共存的。

图 1-1　基本检修体制

事后维修（Break-down Maintenance）又称为故障维修，是在设备功能失效或发生故障时不得不进行的非计划性检修。按照企业的管理理念，事后维修一般用于对生产影响小的设备、非重点设备、有冗余配置的设备或采用其他检修方式无法实施的设备。这种维修方式属于被动维修。

预防性计划检修（Time-Based Maintenance）又称为计划检修，是一种按照时间计算确定设备是否检修的预防检修方式。这种检修适合于已知设备磨损规律的设备，以及难以随时停机进行检修的流程工艺、自动生产线设备。它是根据设备磨损的统计规律或经验，在平常工作中总结出检修种类、检修内容、检修周期、物资消耗等规律的检修方式。这种维修方式属于缺乏先进手段下的主动维修。

改进性检修（Corrective Maintenance）是一种主动行为，目的是消除设备的制造、安装等中的先天性缺陷或运行中发现的问题，对设备进行针对性的改进或调整，利用合适的时间结合检修过程实施的检修方式。改进性检修与技术改造的目的是一样的，但工作对象存在不同。改进性检修是通过改进和提高设备的可靠性、维修性来提高设备的可用率，严格说来，它并不是一种检修体制。技术改造针对补偿设备的无形磨损，通过检查和修理实践，对设备易出故障的薄弱环节进行改进，改善设备的技术性能，提高可用率。

状态检修（Condition-Based Maintenance）又称预知维修（Predictive Maintenance），是一种以设备状态为基础、以预测设备状态发展趋势为依据的检修方式。状态检修是从预防性计划检修发展而来的更高层次的检修体制。状态检修的实施是通过对设备的日常巡检、定期重点检查与试验、在线状态监测信息和故障诊断信息的收集，经过分析处理，综合判断设备的健康状况和性能劣化状况及其发展趋势，并在设备故障发生前及性能降低到不允许极限前有计划地安排检修。这种检修方式能及时地、有针对性地对设备进行检修，不仅可以提高设备的可用率，还能有效降低检修费用。状态检修属于主动维修。

不同的国家在现行检修体制下根据各自的国情，采用多样化的设备检修方式，如表1-2所示。如前所述，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不止出现在一种检修体制中。表1-2中列出的检修方式都是指具体方式。

表1-2　设备检修方式汇总

设备管理检修方式	事后维修、故障维修	
	预防检修、计划检修、定期检修	
	视情维修	
	改进性检修	
	设备综合管理	规划设计
		制造安装
		生产运行检修
	以可用率为中心的检修	
	全员检修	
	按寿命周期成本最小检修	
	适应性检修	
	以可靠性为中心的检修	
	可靠性维修	
	状态检修、预知维修	

美国源于军事工程所发展起来的后勤工程学，是关于生产设备和

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

物料的存储、供给、运输、修理、维护的新兴学科，它对设备管理现代化起了推动作用，设备寿命周期费用就是后勤工程学研究的重要问题，对检修方式产生了革命性的影响。

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，概括起来，有以下几种检修方式：

（1）检修预防（Maintenance Preventing，简称 MP）。检修预防是一种前置思想，主要是在设计制造阶段就认真考虑设备的可靠性和维修性问题，从设计、生产环节提高设备质量和工艺水平，从根本上防止故障和事故的发生，减少和避免检修。

（2）事后维修（Break-down Maintenance ，简称 BM）。事后维修就是当设备发生故障或者性能低下后再进行修理，其特点是设备的维修费用最低，适合于辅助作业线的简单设备。

（3）改进检修（Corrective Maintenance ，简称 CM）。改进检修是指对设备先天性缺陷或频发故障，按照当前设备技术水平和发展趋势进行检修，从根本上消除设备缺陷，以提高设备的技术性和可用率。

（4）预防检修（Preventive Maintenance ，简称 PM）。预防检修是指根据设备的运转周期和使用频率而制定的提前进行设备现状确认的维修方式。预防检修的重点在于对设备运行周期的理解和使用频率的监控。数据的计量一般需要很准确，此种维护方式多用于易损件的处理。对于易损高耗品必须建立预防检修模式，否则必然会出现突发性停机、停车事故，不利于安全连续性生产的运行。越来越多的公司和机构开始关注设备在线检测、快速维修等技术。预防检修为设备管理提供了更多先进维修维护手段，保证了设备安全生产，提高了企业综合经济效益。预防检修是建立在设备检查基础上的，根据设备运行状况决定是否检修的一种方式。

（5）预知维修。预知维修是以设备状态监测（振动监测、油样分析、声发射分析、微粒分析、腐蚀监测）和预测为基础的一种维修方式，是维修方式的一种高级发展形式。

结合多种维修方式，现正在逐步推行的一种检修方式是状态检修。

苏联的检修体制以计划预修制为主，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。检修方式主要有检查后修理、标准修理和定期修理三种。苏联的检修体制对我国检修体制产生了比较重要的影响。

根据设备性质的不同,德国的检修体制细分为两种,即粗放型检修和集约型检修。粗放型检修采用的方式是事后维修,考虑的因素是不追求设备潜力的充分利用和使用寿命的延长,适用的主要对象是设计使用寿命较短、故障后果较小及经济磨损快于其技术磨损的设备。集约型检修采用预防检修的方式,目标是充分发挥设备潜力,尽可能延长设备使用寿命,主要适用于自动化程度高、价格昂贵、关键流程设备及工艺和技术进步缓慢的设备。

20 世纪 80 年代后,计算机技术、行为科学、系统工程、现代管理科学等在瑞典的检修科学和实践中得到广泛应用,企业从设备管理的角度出发,从过去单纯追求技术效果到以经济指标为中心的检修理念逐步形成,人们更多地采用社会化、专业化的检修,检修技术也更加先进,事后维修、预防检修和状态检修普遍推广。

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

法国的检修体制采用预防检修为主、状态检修为辅的检修方式,重点设备实行点检管理。

事实上,综合的检修方式在欧洲联盟得到发展。随着欧洲联盟交往的深入,欧洲各个国家的设备检修和管理理念得以相互交流、借鉴,每两年一届的欧洲维修团体联盟国会议更加速了同化过程。意大利、瑞士等以追求设备可靠性、可用率以及运行检修费用最小为核心,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。

日本主要推行全员生产维修(TPM)体制,具有鲜明的日本管理特色。全员生产维修体制有丰富的理论基础,是各种现代管理方法在企业生产中的综合应用(见图 1-2)。全员生产维修体制的主要思想包括:

(1)企业的管理层和一线职工全体参加全员生产维修体制;

(2)与生产相关的计划、运行、检修等所有部门的管理活动都要参加全员生产维修体制;

(3)目标是追求设备综合效率最高;

(4)方式是采用确保设备一直处于正常工作状态的预防检修;

(5)手段是通过开展基层小组活动来主动推进生产检修。

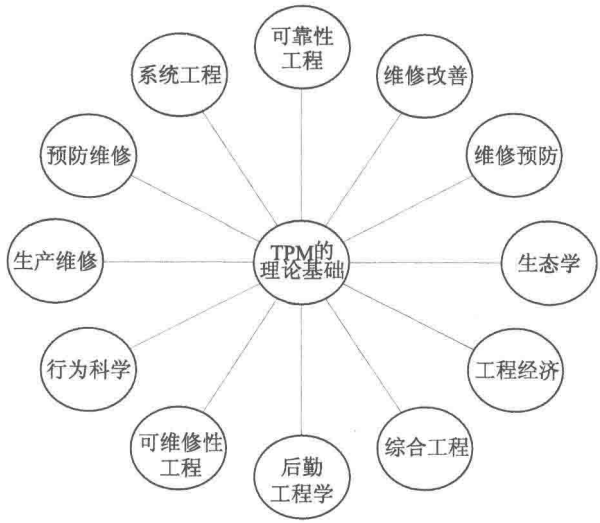

图 1-2　日本全员生产维修体制的理论基础

1.1.2　设备维修基本问题

随着社会生产力的不断发展和技术的进度,大型化、复杂化、网络化设备日益剧增,各种维修体制和检修方式也在不断变化。现代设备,特别是大型设备,一旦出现故障,对人类的影响以及造成的损失是巨大的,如航天失控、飞机故障、核电站泄漏等。发电设备也正是属于这类对经济和社会影响巨大的机电设备。比如 2009 年 8 月 17 日,俄罗斯萨扬 - 舒申斯克水力发电厂发生水淹厂房事故,共造成 75 人死亡,13 人受伤,大面积停电,经济损失 15 亿元人民币,电站修复至少需要 5 年时间。俄罗斯紧急事务部长萧依古称,“这是过去 25 年来的最重大科技灾难,在很多方面都是最巨大的——损害规模、能源工业损失以及经

济损失”。我国机电设备在生产运行中也发生过多起事故。因此，为了避免或减少损失、增加社会财富，各国耗费大量的人力、物力和财力进行设备维修。目前，世界各国每年用于设备维修的费用都相当惊人。据美国统计局公布，美国 1980 年全年税收 7 500 亿美元，用于工业设备维修的费用有约 2 500 亿美元，且其中至少 750 亿维修费用属于浪费性质，主要是修理了不该修理的设备。我国设备年维修费用约为 800 多亿元，占资产总额的 7% ~9%，由于设备维修体制与维修手段落后，维修过程中的浪费严重，总的维修效益低下。可见，如何做好设备维修工作是一个巨大的课题，在维修中能否做到不该修的坚决不修，该修则务必修好值得花大力气研究。如果做好了这项工作，可想而知，节约维修投资、提高维修效益、改善设备状况是大有潜力的。

设备维修就是为保持或恢复设备功能而采取的技术活动。20 世纪 70 年代以来，国内外工程界就设备管理中的维修问题进行了大量研究，逐渐形成了一门新兴的综合性的学科，即维修工程学。维修工程学研究的主要内容包括设备的磨损、设备的寿命理论、设备的可靠性和维修理论、设备的维修技术与工艺等。维修工程学研究的目的，是通过维修管好、用好、修好设备，保证设备处于良好技术状态，满足生产需要，并使维修费用降到最低。

1.1.2.1 设备的寿命理论

设备是有寿命的。通常意义上讲，从开始设计到最终报废所经历的时间就是设备的寿命。设备的寿命可用诸如日、月、年等时间概念来描述，也可用循环次数、载荷周期、损伤累积等来描述。

设备的寿命取决于多种因素，设计、制造和工作环境，运行操作和日常保养、维修水平及对磨损的补偿等都对设备的寿命有至关重要的影响。维修工程学关心设备寿命与维修的关系，对设备寿命进行科学评价。要想实现这个目标，通常需要借助试验和检测手段来进行，通过观察设备金属组织结构和了解设备磨损情况予以综合分析判断。维修工程学对寿命问题的研究主要是围绕以下内容进行：

(1)研究延长设备的使用寿命的维修方法。

(2)科学预测设备剩余寿命，合理安排检修计划。

(3)有效控制设备寿命周期费用。

1.1.2.2 设备的磨损

无论是在使用过程中还是在闲置期间,设备都必然会产生磨损。根据磨损性质的不同,磨损可以分为有形磨损、无形磨损和综合磨损三种。针对不同的磨损情况,可以通过采取修理、改造或更新等办法进行处理。

1. 有形磨损

设备由于运行中机械力或外界自然力的作用而实际产生的损耗和磨损叫作有形磨损或物质磨损。有形磨损可分为第一种有形磨损和第二种有形磨损。

第一种有形磨损,是设备在运转过程中因受力的作用,零部件会发生摩擦、振动和疲劳等现象,致使设备的实体产生磨损。

第二种有形磨损,是设备在闲置过程中,由于受自然力的作用而产生氧化生锈、腐蚀,自然丧失精度和工作能力等。

设备有形磨损带来的后果:技术方面,使设备的使用价值降低,严重时甚至可使设备完全丧失使用价值;经济方面,使设备原始价值降低,甚至完全贬值。

在设备的整个寿命周期内,随着使用时间的推移,设备的磨损速度和程度是不平衡的,一般分为三个阶段,即初期磨损、正常磨损和剧烈磨损,可用图 1-3 所示的关系曲线来表示。

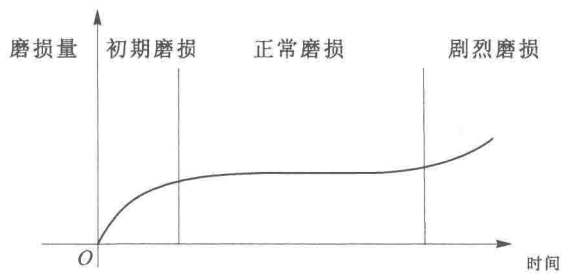

图 1-3 设备磨损与时间的关系

初期磨损指设备在开始投产使用后,零件上的毛刺和加工表面的不平整,在使用时经过研磨或转动摩擦才能达到正常的过程,因此磨损较快。同时,设备在制造、安装方面的某些问题也迅速暴露出来,使初期磨

损速度较快。在正常磨损期，磨损速度缓慢，因而曲线比较平。到了后期，由于设备零部件普遍老化，故障增多，设备磨损会急剧增加，最终报废。在设备的正常磨损期，根据设备的故障运行状态和故障规律，合理安排设备检修，可以有效地减少设备的意外故障，延长设备的使用寿命。

有形磨损与运行工况有很大关系，如工作介质、负荷大小、参数的高低、操作调整方式及频度等。如果恰当采用新技术、新工艺、新材料，可以大大减缓磨损，有些部件寿命可延长至原寿命的五倍以上。

如果是由于物理或化学因素造成设备有形磨损，外部表现形式多种多样，原因也复杂多变。在日常生活和工作中，常见设备的有形磨损形式主要有：

(1)磨料(粒)磨损，由于硬质颗粒导致的划伤类磨损。

(2)点蚀磨损，主要部件金属微粒的剥落，在表面重复接触应力下引起微观裂痕，不断扩大以致引起斑点式剥落。

(3)黏附磨损，两个固体摩擦表面接触时，由于表面间分子作用引起局部黏附，使材料由一个表面转移到另一表面所造成的磨损。

(4)刮研磨损，由于摩擦表面凸凹不平而在移动时形成的磨损。如滚动轴承初期形成的刮研磨损。

(5)塑性变形，物体在外力作用下，受力超过弹性极限而产生塑性变形。此时，即使除掉外力，物体也不能恢复到原来的状态。变形的基本形式有拉伸、压缩、剪切、扭转、弯曲等。

(6)电化腐蚀，两种不同金属发生电气和化学分解作用而造成的腐蚀。

(7)垢下腐蚀，如管道内出现水垢，在垢下形成的一种腐蚀。

(8)金属腐蚀，如在锅炉燃烧时，由于高温破坏了金属组织而产生的腐蚀。

(9)汽蚀与磨蚀。

(10)高频腐蚀，在高频率下造成的腐蚀。

设备有形磨损程度可用式(1-1)进行计算：

$$\alpha_p = \frac{R}{K_1} \tag{1-1}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com