

火电厂设备

状态检修技术与管理

——精密点检 故障诊断 预知排查 风险管控

沙德生 陈 江 编著

HUODIANCHANG SHEBEI
ZHUANGTAI JIANXIU JISHU YU GUANLI



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

火电厂设备 状态检修技术与管理

——精密点检 故障诊断 预知排查 风险管控

沙德生 陈 江 编著

HUODIANCHANG SHEBEI
ZHUANGTAI JIANXIU JISHU YU GUANLI



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

设备状态检修的核心内容是设备状态监测、设备寿命管理和设备以可靠性为中心的状态检修。利用设备可利用的状态监测技术可以实现设备的预知性检修；理解并应用设备寿命管理的理念和方法可以延长关键部件的寿命；实施以可靠性为中心的状态检修，可以找到各设备和设备部件的风险以及防范措施。而点检、精密点检的管理体制则会为顺利达到上述目的提供组织保证。

本书立足于火电设备的系统管理，探讨用技术和管理手段实现预知性检修甚至状态检修和优化检修；力求通过大量的技术和管理案例帮助或引导解决设备管理推进过程中的技术疑难问题和管理疑难问题。

本书主要面向火电设备管理的技术人员和管理人员，希望通过从浅入深、从易到难、从简到繁的叙述，帮助管理人员理清思路，帮助技术人员找到解决问题的方法。

本书可供电力、石化、冶金等行业从事设备管理的技术人员和管理人员、设备检修和维护人员阅读，可供动力设备、流体设备等相关专业师生阅读，也可作为设备运行人员借鉴之用。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂设备状态检修技术与管理：精密点检 故障诊断 预知排查 风险管控/沙德生，陈江编著. —北京：中国电力出版社，2016.5（2016.7重印）

ISBN 978-7-5123-8954-0

I. ①火… II. ①沙… ②陈… III. ①火电厂-设备-故障诊断 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 035463 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 5 月第一版 2016 年 7 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 489 千字

印数 5001—7000 册 定价：80.00 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

安全、可靠、节能、环保是电力生产管理的永恒主题，设备管理是企业本质安全的基础，是保证可靠、经济及环保运行的基础。

探索设备管理，特别是推进优化检修是我们的不断追求。状态检修技术与管理经过多年积累，结合新技术、新方法、新机制的应用，将助推企业在适应新市场需求，转型升级，提升企业质量和效益，提升竞争力发挥重要作用。

王同岭

前言

首先,感谢各位领导、同事和朋友们的支持和帮助,使第一本专业书籍《火电厂设备精密点检及故障诊断案例分析》一书得以顺利发行。随着不断的学习和提高,逐步发现了书中的不足和缺憾,特别是参加中国电力企业联合会组织的到大唐集团、中国电力投资集团公司、华能浙江分公司、浙电嘉兴电厂、国华准格尔电厂、深能源沙角B电厂,以及受邀参加华能江苏分公司、华能海门电厂、华能珞璜电厂、华能塔什店电厂等企业的几十次讲课交流后,触发我要对前一本书进行全面的补充和完善,期望更能贴近工作实际,解决实际问题,为电力设备管理水平的提升尽自己微薄之力。

本书侧重从火电设备系统管理的角度,介绍点检、精密点检和预知性检修的关系,围绕困扰设备管理的四大疑难问题(设备分类问题、检修项目确定问题、巡查的四定问题、设备异常情况下的应急处理问题)明确解决问题的方法,即学会利用集体的智慧和经验,利用风险分析理论,开展以可靠性为中心的状态检修,形成设备故障模式资料库,为点检的四定(定点、定内容、定标准、定周期)等四大问题,提供尽可能准确的、科学的依据,为开展设备管理,找到主要矛盾和主攻方向提供保证。

本书对设备状态监测理论和实践进行了系统的描述,强力推荐可利用的状态监测技术(振动监测、油液监测、红外成像监测、声学监测等)的实施。期望在设备的预知性检修方面获得突破,为避免或减少突发性故障做出成效。尤其是设备的振动状态监测和故障诊断技术,应该得到重视和推广。有专家发表文章,明确提出,没有很好地使用振动故障诊断技术预测和处理设备故障,就谈不上真正的状态检修。美国电力科学研究院研究成果也明确说明:振动监测已经成为很多电厂预知性检修程序中使用的首要技术。如果使用恰当,振动监测将是一个宝贵的工具,它可以在机器发生严重故障前探测和诊断机器故障。所以,本书对振动故障诊断理论及案例进行了翔实描述,体现了从易到难、从简到繁逐步提高的思路,并在《火电厂设备精密点检及故障诊断案例分析》所述案例的基础上,补充了许多新的案例,供大家参考。

本书对设备的寿命管理也进行了探讨。虽然目前设备寿命管理系统预测的准确性没有得到认同,管理系统也未得到广泛的应用,但笔者以为,设备寿命的理念应该得到理解,并在设备管理中得到体现。因为设备管理的最高境界是“设备不生病、少生病!”。消除缺陷、预知性诊断和检修固然重要,而通过保养、维护、控制、改造使设备寿命延长才是设备管理的真谛!

优化检修是指改进检修的所有过程。通过设备状态监测、寿命管理和以可靠性为中

心的状态检修方法,分析出设备的故障规律、寿命规律和风险规律,就可以实现设备的状态监测点的优化、内容的优化、标准的优化、周期的优化、检修项目的优化以及维护保养的优化等。由于电力设备高稳定性和可靠性的要求,以及设备的复杂性和可预知性不同,要求对重要设备宁可过检修也不能欠检修。所以重要辅助设备,尤其是重要辅机可以成为预知性检修的试验田和突破口。在取得经验积累的基础上,推广应用于重要设备或低风险的设备。

本书第一篇,解释了点检、精密点检、定修、点检管理、定修管理、预知性检修等,着重比较分析了点检和预知性检修的关系,用点检、精密点检的管理手段和方法达到预知性检修的状态和结果,并用案例对可利用的状态监测技术的使用进行了例证。

本书第二篇,着重就振动状态监测和故障诊断这只设备管理中的“拦路虎”进行了深入的分析和讨论,用理论和实例,力求从浅入深、从易到难,在技术深度上获得突破,为实现真正意义上的预知性检修扫清障碍。

本书第三篇,以寿命管理和以可靠性为中心的检修理论为基础,探讨影响设备寿命的因素和设备风险影响因素,以及延长寿命和减少风险的措施。用案例作为引导,以期获得共鸣,在设备的寿命管理和可靠性管理推广方面有所成效。力求优化各种检修方法和手段,推动设备状态检修和优化检修的实施。

本书编写过程中,中国华能集团公司副总经理、华能国际电力股份有限公司总经理刘国跃同志进行了审阅并赠言,华能国际电力股份有限公司赵平副总经理亲自审校并提出了许多宝贵的意见和建议,华能集团江苏分公司庞远彤总经理给予了关怀和指导,同时得到了华能集团湖北分公司张国平总经理、华能集团山西分公司张洪刚副总经理、武汉博晟信息科技有限公司贺小明董事长总经理、南京工程学院缪国钧教授、中国电力企业联合会科技服务中心刘春文处长、北京必可测科技有限公司何立荣董事长、上海鸣志自动控制设备有限公司范兵副总经理、南京中大趋势测控设备有限公司邹丛林总经理、华能塔什店电厂金建华厂长、华能海门电厂卢怀钿副厂长、华能汕头电厂孙伟鹏副厂长、华能珞璜电厂周刚总经理助理等领导和朋友的支持和关心以及华能淮阴电厂检修部吴国民副主任、华能金陵电厂燃脱部史居旺专工、华能巢湖电厂检修部高开峰专工等的帮助,在此一并表示诚挚的感谢!

限于作者水平,书中难免会有疏漏之处,敬请广大读者批评指正,并提出宝贵意见或建议。

编 者

2016年5月

目 录

前言

第一篇 电厂设备管理

第一章 设备管理概述.....	3
第一节 设备管理的意义.....	3
第二节 状态检修的演进.....	4
第三节 设备管理的愿景.....	5
第四节 发电设备管理国内外发展情况.....	6
第二章 设备点检定修	10
第一节 点检和精密点检	10
第二节 设备定修	12
第三节 点检定修管理	13
第四节 点检定修制	21
第三章 设备状态检修	23
第一节 设备状态监测与诊断	23
第二节 状态监测诊断方法与评价	26
第三节 状态监测及诊断实践与案例	32
第四节 状态监测仪器仪表及系统	41

第二篇 转动设备振动监测与故障诊断

第一章 转动设备振动故障诊断理论基础	47
第一节 转子振动的概述	47
第二节 转子系统振动故障诊断技术	52
第三节 振动监测基本名词术语图谱	53
第二章 转动设备振动故障诊断案例	69
第一节 不平衡引起的振动及案例	69
第二节 中心不正引起的振动及案例	79
第三节 基础松动引起的振动及案例	84
第四节 轴承损坏引起的振动及案例	99
第五节 齿轮啮合引起的振动及案例.....	103
第六节 动静摩擦引起的振动及案例.....	108

第七节 轴承轴向振动原因及案例..... 116

第八节 流体诱导引起的振动及案例..... 128

第三章 转动设备动平衡技术..... 138

第三篇 设备优化检修

第一章 设备寿命管理..... 145

第一节 设备寿命管理理论..... 145

第二节 设备寿命管理的应用及案例..... 155

第二章 设备可靠性管理..... 166

第一节 以可靠性为中心的维修（RCM）理论 169

第二节 以可靠性为中心的维修（RCM）应用 177

第三章 设备优化检修..... 197

第一节 设备优化检修内容..... 197

第二节 设备优化检修评估和推动..... 215

第三节 设备优化检修总结和展望..... 216

附录一 七大辅机故障模式危害度及措施..... 221

附录二 设备管理相关制度..... 275

附录三 状态监测设备及设备管理系统..... 292

参考文献..... 309

火电厂设备状态检修技术与管理

——精密点检 故障诊断 预知排查 风险管控

第一篇 电厂设备管理



第一章

设备管理概述

“基础不牢，地动山摇。”设备缺陷往往是各类不安全情况的诱因。2013年8月25日，某电厂执行“真空泵定期切换试验”启动1B真空泵时，汽轮机PC1B段进线电源开关41QJ2智能脱扣器越级误动，造成汽轮机PC1B段母线失电，保安PC1B段母线瞬间失电，从而引起小汽轮机速关油压波动，最终导致小汽轮机调阀关闭，锅炉给水流量低，MFT动作。

一个企业无外乎人、设备、环境、管理，而设备是人手的延伸，帮助人实现各种目标。可以说设备（工具、机器）为人做出了特别贡献，如果设备不稳定、不可靠，将会怎样？必将影响效率甚至影响成败。马蹄铁，因为失去一个钉子，可能导致一个国家的灭亡。电厂的一次非计划停机，可能导致一炉钢水凝固，一群人受冻，甚至电网崩溃。

第一节 设备管理的意义

在我国，火力发电厂（火电厂）以煤炭作为重要能源，占有举足轻重的作用。而由于电力的不可储存性，发出来的电要能在瞬间利用，于是电力设备必须连续不断地运行，否则就要影响企业的生产、家庭生活甚至影响社会的稳定，这给电力企业带来巨大挑战。要求电力企业特别是火电企业安全稳定运行，成为国家和社会的基本要求。对火电企业的管理者而言，必须要承担起这份社会责任。而由于设备事故导致巨大的人身和财产损失的比比皆是。所以，研究设备管理实践及设备管理模式，以提高设备可靠性、安全性、经济性，成为各电力企业对标管理，市场竞争力的主要评价指标。而设备的可靠性又是企业安全性和经济性的基础，只有系统的主要设备和重要辅助设备故障少，没有抢修，一般设备缺陷率低，整个企业都能按部就班地开展计划工作，才能实现真正意义上的安全，从而稳步提高经济性指标。反之，设备非计划次数多，影响负荷的抢修多，缺陷多，整天忙于应付，疲于奔命，何来安全和经济？

设备是企业固定资产的主要组成部分，是企业生产中能供长期使用并在使用中基本保持实物形态的物质资料的总称，也可解释为，进行某项工作或供应某种需要所必需的成套建筑或器物。管理就是界定企业使命，并激励和组织人力资源去实现这个使命。设备管理，即以设备为研究对象追求设备综合效率，应用一系列理论方法，通过一系列技术、组织措施，对设备的物质运动和价值运行进行从规划、设计、安装、使用、维护保养、改造直至报废的全过程管理。

为提高设备的安全性、经济性和可靠性，必须加强设备管理，应用先进的设备管理理论和方法，如精密点检下的预知性检修，寿命管理，以可靠性为中心的状态检修理论等，提前发现缺陷，及时解决问题，控制薄弱环节，以延长设备寿命。特别是近年来有关汽车的可靠

性设计和专业维护保养方式以及对人的寿命的重视,通过体检、调养、预防等方法来延长寿命,这些都可以为更好地开展设备管理提供借鉴作用。

第二节 状态检修的演进

在不同时期,根据不同的行业特点和设备管理要求,已经出现了四种检修方式,即事后检修、预防性检修、预知性检修和改进性检修。这些检修方式反映了从粗放到精细管理的演进,相互并不排斥,共同存在并互为补充。

(1) 事后检修,又称故障检修或纠错检修,是当设备发生故障或失效时,对设备相关部位进行的非计划性检修。现在设备管理中主要用于不可预知的设备故障问题,或影响设备可靠性较小的所谓的“C”类设备。这种方式可以使设备的零部件发挥最大的效能。

(2) 预防性检修(计划性检修)是一种基于时间段的定期检修。它对火电厂主设备如锅炉、汽轮机、发电机、脱硫设备等,无疑是一种保守的检修方式。但随着对设备故障规律的把握,设备部件寿命的延长,关键部位可靠性的提升,预防性检修周期正在不断延长。

(3) 预知性检修是避免过多的预防性检修造成的浪费(人力,时间,金钱)而演进过来的更加精确的、更加精细的检修体制。它以设备状态为基础,以预测状态发展趋势为依据。它根据对设备的日常点检、定期重点检查(离线状态监测)、在线状态监测故障诊断所得信息,经过分析处理,判断设备的健康和性能劣化状况,及时发现设备故障的早期征兆,并跟踪发展趋势,从而在设备故障发生前及性能降低到不允许的极限前有计划地安排检修(如利用电力低谷时段处理风机、磨煤机、空气预热器、给水泵等有两套系统的设备的故障)。这种检修方式能及时有针对性地对设备进行检修,不仅可以提高设备可用率,而且可以有效降低检修费用,甚至可以为检修安全过程控制提供充足的保障时间,为技术人员总结设备故障规律,查找设备薄弱环节,进行技术改进或维护控制提供技术支持。

狭义的状态检修即预知性检修,而广义的状态检修,是包括了从设备寿命角度总结的规律和从以可靠性为中心的状态检修中所发现的要素,而进行检修和维护的一种模式。对一些有损坏规律的设备(如材料超温、寿命、磨损等),可以适度提前安排检修。与预防性检修相比,预知性检修更加体现了人的主观能动性和管理精细化。

(4) 改进性检修是为了消除设备的先天性缺陷或频发故障,对设备的局部结构或零件的设计加以改进,并结合检修过程实施的检修方式。改进性检修通过检查和修理实践,对设备易出现故障的薄弱环节进行改进,以改善设备的技术性能,提高设备的可靠性和可用率。无论是对电厂的主设备、重要辅机设备还是一般设备都适用,可使设备故障率降低,延长设备寿命,是设备检修管理的重要方式。

从(1)、(2)、(3)、(4)的发展过程可以看出,设备检修的目标是不断提高设备的可靠性、减少停机同时减低成本。特别是状态检修,通过加强状态监测,可以发现早期故障征兆;通过寿命管理分析,可以预知性地判断出设备潜在的故障风险;通过可靠性分析和风险评估,可以找出设备的薄弱部位和部件,并制定有针对性的措施。实施状态检修可以使电厂的安全性、设备的可靠性、经济性进一步提高,使环保指标得到有力保证。

此外,“优化检修”是改进公司检修事务的总过程。优化检修包括改进四个主要检修过程:工作确定、工作控制、工作执行和工程总结。同样,优化检修包括改进一个公司的检修

事务、检修管理和商业文化、人员技能和劳动力工作文化、自动化处理及改进检修效率的有效应用，就是说设备检修管理已不仅在技术层面上进行提高，关键是从管理的角度思考怎么达到设备管理、控制与提高。

第三节 设备管理的愿景

设备状态检修所带来的各种优点已被大家认同，并将成为以后设备管理的趋势，但在如何开展及做得更好，并在企业中快速地推广和突破方面，依然有不同的意见和看法。

火力发电厂实施设备状态检修的指导性意见中提出：设备状态检修是根据先进的状态监测和诊断技术提供的设备状态信息，判断设备的异常、预知设备的故障，在故障发生前进行检修的方式，即根据设备的健康状态来安排检修计划，实施设备检修。状态监测是状态检修的基础，而对监测结果的有效管理和科学应用则是状态检修得以实现的保证。

知名专家的观点还有：①状态检修是试图代替固定检修时间周期，根据设备状态确定的一种检修方式，对发电设备实施状态检修的最佳模式是预知性检修和以可靠性为中心的状态检修以及相应的技术支持系统；②普遍的设备状态检修解释为，依据设备的实际状况，通过科学合理的安排检修工作，以最小的资源消耗保持机组的安全，经济，可靠的运行能力。国际上开展状态检修优化的模式有很多，其中主要有三种方式，即以设备可靠性为中心的维修、以设备状态监测为基础的预知性检修和以寿命评估为基础的设备寿命管理等。这些模式的理论不同，使用范围和特点也不同。电厂采用时一般要根据本厂的机组特点和设备维修重点选择一种或将不同的模式组合，产生出适合电厂自身状态检修模式。

可以说，目前对状态检修概念的理解还有不同的意见，但就核心内容而言，一般包含以设备状态监测为理论的预知性检修、以寿命管理理论为依据的设备寿命管理、以可靠性(RCM)理论为中心的状态检修，和以风险分析为基础的检修(RBM)等。

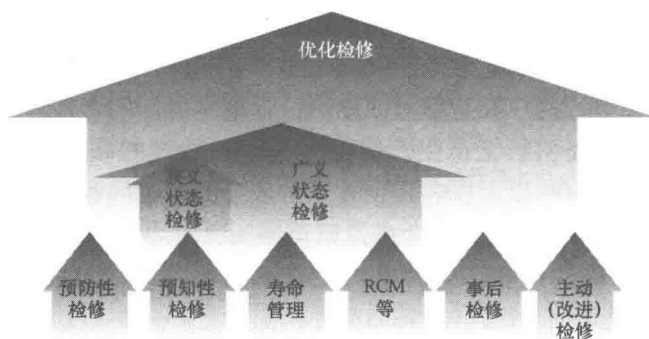


图 1-1 几种检修概念的关系

仅从技术层面理解，状态检修也是相对狭窄的。虽然理论上有一定的总结和提高，但就实际效果而言，无疑需要用管理的理论方法和手段进行卓有成效的拓展和推动。

在状态检修中，确定设备状态需要依靠很多技术，但总结起来可以归类为一些基本的支持技术。从最上层可以归纳为三大基本支持技术：设备状态监测与故障诊断技术、设备可靠性评价与预测技术、设备寿命评估与管理技术。按其技术分类，可以把目前的主要实用技术归纳为性能分析与诊断、振动噪声分析与诊断、红外温度分析与诊断、油液分析与诊断、泄

漏分析与诊断等几类。这些诊断技术在发电设备中已得到成功应用，并取得了很好的效果。

诊断技术是多领域综合性技术，随着科学和技术的发展在不断进步，不仅使现有的技术向实时、智能、低成本发展，同时也催生出新的诊断技术。针对设备的动力学行为和故障机理的深入研究，也在不断完善和补充状态诊断和评价方法。作为发电企业，状态检修是其资产优化管理的一部分，也是安全生产的一部分，选择适合本企业的设备诊断技术和管理模式是根本。选择自己能掌握和用好的技术是保障。在三个支持性技术中，可靠性分析主要靠组织领导，发挥相关人员的技术优势，提高对设备及部分部件的关注和防范；寿命管理，需要科研单位、电力科学研究院在高温材料等方面的技术支撑；而设备预知性检修及故障诊断技术，可由电厂技术人员通过不断的应用和总结，提高预知的准确性。在这些主要实用技术中，最难以被消化、吸收并发挥作用的技术是转动设备的振动故障诊断。一个电厂的转动设备有几百台，缺陷最多，故障率最高。而振动故障又最难解决，成为电厂设备管理推动过程中的最大障碍，特别是振动信号的早期捕捉、早期发现，可以为利用低谷不停机消除争取到宝贵的时间，所以这门技术应该引起电厂设备管理领导的重视，并调精兵强将予以攻关，为真正意义上的状态检修和优化检修清扫障碍，铺平道路。

第四节 发电设备管理国内外发展情况

我国电力行业的设备管理体制，是在我国第一个五年计划期间从苏联引进设备的同时引进了当时苏联的设备管理模式。采用这种管理模式，企业的管理层次多，检修的频度和强度大，因而需要大量的管理人员和维修人员，既不利于企业总体效益的提高，又不能集中精力把设备真正管好。随着改革开放的不断深入，我国国民经济的快速增长，电力行业无论从设备的先进性和单机容量上都有大幅度的提升，原有设备管理体制和管理方法倍受质疑，这是点检定修制进入我国电力行业的时代背景^[6]。

原电力工业部为了改变我国发电企业管理落实的局面采取了相应的措施：

(1) 20 世纪 90 年代初，原电力工业部在北京举办为期 1 个月的发电厂管理培训研讨班，邀请了几位日本发电厂的厂长，面对面地研讨日本发电厂的管理体制、管理方法和管理经验，实际也是一次对设备实行全员生产维修（TPM）管理的高端培训。参加这次培训的有我国当时容量在 100 万 kW 以上或者是全省容量最大的发电厂的厂长。

(2) 20 世纪 90 年代初，原电力工业部邀请英国国家电力公司的几位厂长在北京就英国发电厂的管理作为时一周的讲座，当时电力工业部所属许多大型发电企业和有关研究院（所）的领导参加了这次培训。

(3) 在 20 世纪 90 年代中期，对于新建电厂，原电力工业部明确规定了新厂采用新的管理体制，人员编制大幅度减少。电厂原则上不配检修队伍，要求管理逐步与国际接轨。

(4) 20 世纪 90 年代中期开始，原电力工业部在多次会议上明确在电力设备检修中要逐步推行状态检修，并部署了有关的试点单位。

点检定修制从管理体制到管理方法的全面引进，在我国则是从上海宝钢集团开始的。

上海宝钢集团公司一期工程全套引进日本的设备（包括该钢铁联合企业的自备电厂），在引进设备的同时，花了数千万美元引进全套管理软件，在设备管理上实行点检定修制。上海宝钢自备电厂原来受原电力工业部华东电管局管理，后来划归原冶金部的上海宝钢集团。

上海宝钢自备电厂也是中国电力企业联合会火力发电分会（简称中电联火电分会）的成员厂，在两次电厂厂长的年会上他们介绍了采用点检定修制的成功经验。这些经验表明，他们从不自觉强制实行点检定修制到比较自觉地执行这种管理方法，设备健康情况明显提高，故障减少，在提高设备可靠性（全年未停机）的同时，在降低维修费用上取得明显成效。

作为我国电力行业的行业协会，中电联火电分会根据 1997 年厂长会上确定的管理跨越和创新的思路，认为点检定修制与电力行业深化改革相适应，即新厂新模式可以采用这种体制，老厂的改革可以借鉴这种管理模式。因此，该次会议后决定把点检定修制作为重点研讨和推广的课题。

与此同时，当时原冶金部也从宝钢集团实行点检定修制中总结了这种先进管理模式优点，并安排十个钢铁企业进行试点。对试点情况进行统计表明，在设备管理上推行点检定修制后，设备的故障率和事故停机率下降 40%，维修费用下降 20%~30%。

点检定修制的先进理念和内涵符合设备管理的客观规律，被世界上很多发达国家所采用；它一进入我国电力行业，就受到众多发电企业的关注。

从点检定修制在电力行业应用推广进程表（见表 1-1）中，可以看到点检定修制的强大生命力，在短短六年多的时间内得到了广泛的应用，目前许多大的发电公司已将其明确为设备管理的基本模式。

表 1-1 点检定修制在电力行业应用推广进程表

时间	应用和推广单位	推广和应用形式	备 注
1997 年	浙江北仑电厂	继上海宝钢自备电厂后，第一家进行点检定修制试点的大型火力发电厂	先在燃料专业试点，以后逐步推广到全厂，装机容量 300 万 kW(5×60 万 kW)
1998 年初	中电联火电分会和原华东电力企业协会	召开电力行业内第一次设备点检定修管理的研讨会	由上海宝钢集团自备电厂设备管理部门作专题介绍
1998~1999 年	原华东电管局所属三省一市电力公司生产管理部门	召开各省、市所属发电企业在点检定修管理上的具体做法，推出了我国第一本《点检定修管理导则》	由中电联火电分会有关专家作专题介绍
1999 年 5 月	上海电力股份有限公司	为规范原浙江省电力公司所属发电厂（包括水电厂）在点检定修管理上的具体做法，推出了我国第一本属于省公司一级的企业标准	由中电联火电分会科技服务中心协助编写《上海电力股份有限公司点检定修管理导则》

国外在状态检修体制以及相关支持技术方面的研究与实践，都已取得了长足的进展。美国、日本、欧洲各国都有关于这方面的大量报道。奥地利维也纳大学的 Mueller H. 在 1983 年就开始研究火电厂的计算机辅助维修管理^[7]。加拿大的 Billinton R. 等在 1984 年发表了在考虑电网互连影响的情况下优化发电设备检修计划的文章。英国中央发电局（Central Electricity Generation Board, CEGB）的 Low M. B. J. 等发表论文，总结中央发电局的状态监测工作，对比研究了状态检修和现有检修方式的优劣。同年，在美国西海岸第 49 届电力工程和运行年会上就有电力设备状态检修的相关文章发表。

进入 20 世纪 90 年代，有关研究集中到以可靠性为中心的维修（RCM）、诊断技术^[14]与状态检修、电力系统检修计划优化等问题上。1990 年，苏格兰电力公司的 Brook R. N. T.

等介绍了实施汽轮发电机组振动状态在线监测、推进状态检修^[15]的情况。General Physical 公司的 Cipriano James J. 等研究了延长发电设备寿命以及优化寿命管理中的电厂设备状态评价问题,探讨了状态检修技术的另一个方面。美国机械工程师协会(ASME)开始在核电站推行 RCM,提出了一套实施程序 Inservice Testing Code (服务中的测试代码),核电站可以根据实际情况修改和扩展这个程序。采用 RCM 后,核电站的设备可用率由不足 80% 提高到 80%~90%。

1997 年,美国的 Lukas 和 Malte 等研究了基于润滑油状态监测的状态检修体系,指出润滑油监测、振动监测、性能监测和红外温度监测是状态检修的基本检测手段。

国外已经进入中国市场的、在开发和推广应用状态检修技术方面比较著名的机构有美国电力研究院及其监测诊断中心(EPRI M & D Center)、美国 CSI 公司、美国 ENTEK-IRD 公司,以及一些仪器公司,如 Bently 公司、BMA Advance Maintenance & Cleaning 公司(西马力)和其他主要以红外测温设备为主的公司等。它们已将多种诊断和检修系统运用于电厂锅炉、汽轮机、发电机系、辅机系统以及输变电设备上。2000 年以来,国外对状态检修的相关研究主要集中在方法的研究、新技术的研究、具体实施系统的研究等方面。美国布法罗大学的 Raheja D. 等人提出了一种混合了数据融合和数据挖掘技术的方法,试图对设备健康状态作全面评估,从而得到更加准确的维修决策,构造一个在不同工业领域都能通用的状态检修体系^[247]。Amari Suprasad V. 等人采用马尔可夫链,研究了一种设备性能指标的闭环分析方法,给出了一个对不连续劣化系统进行及时监测和维修,使其可用率最大化的状态检修模型^[248]。美国路易斯安那州泽维尔大学的 Chen Dongyan 等人用半马尔可夫决策模型分析连续过程决策和随机时间点决策,研究了设备在劣化期间对系统可用性的影响,提出了确定检测循环周期的方式,从而决定最佳的检查策略和进行预知维修^[249,250]。英国罗伯特戈登大学的 Arthur N. 提出了一个定量延时维修模型,并在一种设备的离线振动监测中应用,可用于确定最优状态检修间隔,优于传统的定性状态分析^[251]。法国的 Antoine 等人同时考虑零件替换和检查时间决策,研究随机和连续劣化系统的维修费用最小化,建立了基于检查和替换的联合维修模型^[252]。法国的 Castanier B. 等人分析具有连续非周期监测和维修行为的可维修系统,当系统的状态连续劣化时,利用系统状态的半再生性质建立了一个系统行为随时间变化的随机模型,用于评判维修策略的性能,如系统维修后能达到的长期可用率和期望维修开支等,以达到确定最优维修和检查时间的目的^[253]。印度加尔各答管理学院的 Saranga Haritha 研究了一种设备状态预报装置,目的是预防机械零件的老化失效,并同时提高系统的可靠性和耐用度;对于如何利用合适机会进行维修,进行了评价维修活动花费有效性的研究^[254,255]。Kaesche III 等介绍了一套基于互联网的设备维修规划和决策专家服务系统,这套系统包括决策支持、数据分析、状态监测、健康评价、后果预测和寿命评价六个功能,系统可以利用维修监测数据和设备运行数据^[256]。

国内从 1996~2002 年原国家电力公司重组之前,原国家电力公司以及各网省电力公司组织了若干发电设备状态检修项目和试点工作,通过引进技术和自主研究,培育了一批设备管理先进的电厂,沉淀了一大批骨干人才。在此阶段,原国家电力公司积极立项,支持状态检修的探索工作;华东、华中、东北、华北等网电力公司,以及山东、浙江、河南、上海等省电力公司,都开展了试点工作;北仑电厂、邹县电厂、镇海电厂、沙角 C 电厂、华能淮阴电厂等坚持开展设备点检工作;华中科技大学、华北电力大学、西安热工研究院等率先开

展了状态检修的理论研究和技术开发工作,取得了可喜的基础研究成果,逐步形成了状态检修的理论体系。但是,由于刚起步,状态检修的具体实施方案和理念尚处于形成阶段。2002年原国家电力公司发布的《火力发电厂实施设备状态检修的指导意见》应该是对这一阶段的总结,也是重要的成果。

目前,国内对状态检修的研究与实践随着管理理念和技术的进步不断发展。从1996年开始,我国在电力系统内加快了检修管理现代化的步伐,积极推广状态检修。近几年,很多文章介绍了实施状态检修工作的情况、体会,以及研究成果。据不完全统计,2000年以来,在国内正式刊物上发表的与状态检修或状态维修相关的文献约2553篇。可见,近五六年以来,状态检修问题一直是一个热点。

对涉及发电设备状态检修的文献进行分析,近3年以来发表的文献中,具有实质性内容和可操作性内容的文献明显增加,反映出状态检修工作逐步从解决思想认识向解决实际问题方向发展。其中,部分文献详细介绍了火电厂状态检修的工作实践和成效,对同类企业有借鉴意义;另一部分文献从战略的高度论述状态检修实施策略和发展途径,有利于发电企业在做状态检修顶层设计时参考;有些文献研究信息管理技术在设备管理和状态检修中的实际应用;还有很多文献深入研究了关于状态检修的具体课题,取得了实际成果;重点研究先进实用技术的文献也不在少数,这些研究在若干领域取得了突破。

以点检制为管理模式的设备管理方式在一些电力企业得到了运用,也取得了可喜的成果。但由于点检制带来管理上的相互掣肘,以及技术运用的匮乏,点检及精密点检仍然停留在设备状态监测和诊断分析的水平。点检制特别注重点检人员的责任和点检的过程管理。而状态检修则更加强调所取得的状态和结果,而且在技术理论运用上也有进一步的发展。寿命管理理论、可靠性理论、风险分析理论等使状态检修理论得到了丰富并快速的提升。从设备管理的历程看,点检制下的设备管理,在技术方面具有明显的经验性、粗放性和探索性。而状态检修则除了加强设备状态监测(各种检修模式都可以开展)外,还不断推出新的技术和新的管理理论,使状态检修得到更广泛的认同和推广。可以说点检制下的设备管理是设备管理的初级阶段,而状态检修无论是管理(目标管理)还是技术水平都达到一个新的高度。

华能国际电力股份有限公司,立足具体实际,在设备检修方面进行了卓有成效的探索。20世纪90年代结合引进技术提出了计划检修的细分,即由单一的大、小修调整为A、B、C、D四级检修,根据设备总体状态减少检修时间,降低成本。2004年,21世纪初,结合与美国电科院的合作,提出了根据管理系统设备对象特性的不同分类进行事后、计划、状态、改进等方式的检修,推进了优化检修的开展。