

汽轮机运行性能 诊断技术及其应用

李 民 郑伟明 著

科学出版社



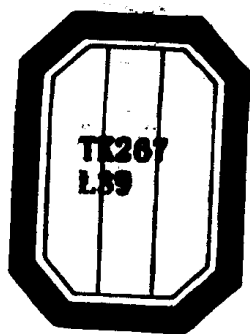
TK267
L39

454297

汽轮机运行性能诊断技术及其应用

李 勇 陈梅倩 著

曹祖庆 审订



00454297

科学出版社

1999

17-17 105

内 容 简 介

本书是一本反映汽轮机运行性能(包括热经济性和安全性)诊断方法的专著。书中总结了国内外研究者在汽轮机运行性能诊断领域的研究成果,并给出了许多具体的应用实例。

全书共分七章。第一章为绪论,阐述了汽轮机性能诊断的内容、当前的发展状况及存在的问题;第二章对几种典型的汽轮机变工况计算方法进行了统一,并对其中存在的问题作了改进,这部分内容是汽轮机热经济性诊断的基础;第三章基于汽轮机原理,系统地研究了汽轮机各个效率间的耦合性,提出汽轮机本体与回热系统热经济性降低故障的分离方法;第四章对 BP 网络训练算法进行了讨论,并提出了 BP 网络的改进算法,最后给出了神经网络在汽轮机热经济性诊断中的若干应用;第五章提出了一种新的凝汽器清洁率的监测及预测方法,并介绍了基于神经网络的凝汽器故障诊断方法;第六章结合实例叙述了汽轮机转子振动故障的特征及基于神经网络的诊断方法;第七章研究了 BP 网络在汽轮机故障预测中存在的问题及改进方法,介绍了对实际运行汽轮机振动故障的预测结果,并展望了其应用前景。

本书可供能源、电力、化工、冶金及机械等行业的科研和工程技术人员参考,也可作为上述相关专业的高等学校本科生及研究生的选修教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机运行性能诊断技术及其应用/李勇,陈梅倩著.-北京:科学出版社,1999

ISBN 7-03-006752-5

I. 汽… I. ① 李… ② 陈… II. 汽轮机运行-性能-参数测试
N. TK267

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 16911 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 10 月第 一 版	开本: 850 × 1168 1/32
1999 年 10 月第一次印刷	印张: 7 1/4
印数: 1—1 500	字数: 183 000

定价: 16.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

随着汽轮机向高参数、大容量方向的发展,特别是由于电子计算机在汽轮机中应用的逐渐普及,对汽轮机运行性能——经济性和安全性提出了更高的要求。同时,基于汽轮机运行经济性及安全性而展开的状态维修,也日益受到设计及运行人员的重视。

汽轮机的运行性能诊断技术,是一种了解和掌握汽轮机运行过程中的安全及经济状态,确定其整体或局部的性能是否正常,及早发现引起性能下降的原因及部位并预测其发展趋势的实用技术。该技术的实施,对于提高汽轮机运行的经济性和安全性、降低维修费用及缩短停机维修时间具有重大的意义。同时,该技术的实施,也将为汽轮机由目前的定期维修逐步过渡到状态维修及预知维修,奠定坚实的理论基础。

鉴于上述原因,作者完成了此专著,目的在于通过促进汽轮机运行性能诊断技术的推广与应用,提高汽轮机的运行安全性与经济性。本专著主要以本书作者之一李勇在东南大学曹祖庆教授指导下完成的博士论文为基础,系统地总结了国内外研究者特别是作者在基于热经济性诊断与故障诊断的汽轮机状态维修方面的最新研究成果。

全书共分七章。第一章是绪论,介绍了汽轮机性能诊

断的内容、意义以及当前的发展状况和存在的问题。第二章为汽轮机变工况计算方法分析及改进,对几种典型的超临界级变工况计算方法进行了统一,并对一些变工况计算方法存在的问题作了改进,同时对目前广泛应用的弗留格尔公式的证明方法及其应用中应注意的问题进行了讨论。这部分内容是汽轮机热经济性诊断的基础。第三章是汽轮机热经济性诊断的原理模型,基于汽轮机原理,系统地研究了汽轮机各级、各级组、各汽缸及其相对内效率与理想循环热效率的耦合性,然后提出汽轮机通流部分与回热系统热经济性降低故障的分离方法。第四章为汽轮机热经济性诊断的神经网络模型,对神经网络中BP网络的两种典型训练算法——单样本和批处理算法进行了讨论,并提出了BP网络的改进算法,最后给出了神经网络在汽轮机热经济性诊断中的若干应用。第五章为凝汽器清洁率的监测及故障诊断,提出了一种新的凝汽器清洁率的监测及预测方法和一种基于神经网络的凝汽器故障诊断方法。第六章是汽轮机振动故障诊断的神经网络模型,结合实例介绍了汽轮机转子振动故障的特征及基于神经网络的诊断方法。第七章是汽轮机故障预测的神经网络模型,研究了BP网络在汽轮机故障预测中存在的问题及改进方法和BP网络有关参数的设置,介绍了对实际运行汽轮机振动故障的预测结果,并对其应用前景进行了展望。

本书由东南大学曹祖庆教授审阅。曹先生是我国汽轮机界著名的老前辈,他严谨的学风、一丝不苟的科学态

度以及善于深入生产现场的工作作风,都给作者留下了深刻的印象。几年来,作者不仅在学术上得到曹先生的严格指导,而且在生活和工作上也得到曹先生的热情关心与帮助。作者每一个观点都凝聚着曹先生的学术思想,尤其在本书的最后定稿阶段,曹先生更是严格把关,字斟句酌,反复审阅,我们在此深表谢意。作者为能得到曹先生的指导和帮助而感到十分荣幸与自豪。

另外,我们还要衷心感谢东北电力学院动力系副主任王广军博士、叶荣学教授,管理系主任丁乐群博士,科研产业处的李宏源工程师,以及东北电力学院和北京高等电力专科学校领导和同事,他们对本书的编写工作给予了热情的关怀、鼓励和支持。本书的部分研究内容还得到了东北电力学院博士基金的资助。

最后,我们还要感谢作者的家人,正是由于他们的支持与理解,这本专著才得以出版。

限于作者的水平和实践经验,书中难免出现错误和不当之处,敬请读者批评指正。

李 勇

于东北电力学院

陈梅倩

于北京高等电力专科学校

1999年4月6日

目 录

前言

第一章 绪论..... 1

§ 1-1 火电机组运行状态监测、预测及性能诊断的意义 ... 1

§ 1-2 汽轮机运行状态预测和故障诊断的研究现状及存在的问题 5

§ 1-3 汽轮机运行性能诊断及其内容 8

参考文献..... 9

第二章 汽轮机变工况计算方法分析及改进 11

§ 2-1 概述 11

§ 2-2 汽轮机超临界级的变工况核算方法分析及验算 ... 12

2-2-1 几种典型的变工况核算方法及分析 12

2-2-2 计算结果及比较 19

§ 2-3 汽轮机超临界级热力核算方法存在的问题及改进 21

2-3-1 关于水蒸气性质公式的精度问题 21

2-3-2 关于有损失流动中的临界状态问题 22

2-3-3 关于适合于真实水蒸气临界压力的确定方法问题 25

2-3-4 关于级的反动度及相对内效率的概念定义方法问题 ... 27

§ 2-4 喷嘴调节汽轮机调节级的变工况计算 28

§ 2-5 对弗留格尔公式证明方法的讨论 32

2-5-1 几种理论证明方法及存在的问题分析 32

2-5-2 弗留格尔公式的应用 39

§ 2-6 小结 41

参考文献 42

第三章 汽轮机热经济性诊断的原理模型 43

§ 3-1 概述	43
§ 3-2 汽轮机各级效率间的耦合性分析	45
3-2-1 基本假设及汽轮机各级相对内效率间的耦合性分析	45
3-2-2 两级级组中第一级相对内效率变化对级组相对内效率影响的计算模型	50
3-2-3 多级级组中某级相对内效率变化对级组相对内效率影响的计算模型	56
§ 3-3 汽轮机各级组效率间的耦合性分析	64
3-3-1 汽缸内所有级均处于过热蒸汽区	64
3-3-2 汽缸内有部分级或级组处于湿蒸汽区	66
§ 3-4 汽轮机各汽缸相对内效率效率间及汽轮机相对内效率与理想循环热效率间的耦合性分析	67
3-4-1 汽轮机的能量平衡及各效率的定义方法讨论	67
3-4-2 汽轮机各效率间的耦合性分析	71
3-4-3 各缸相对内效率变化对热耗率影响的计算模型	74
3-4-4 汽轮机理想循环热效率变化对热耗率的影响	79
§ 3-5 初终参数变化对汽轮机热经济性影响的计算模型	80
3-5-1 现有的各种确定方法及存在的问题	81
3-5-2 基于级的详细计算及热平衡计算的方法	84
§ 3-6 汽轮机通流部分和回热系统热经济性下降故障的分离	86
3-6-1 汽轮机通流部分和回热系统热经济性下降故障的分离方法	86
3-6-2 上述诊断过程与等效热降法的区别	88
§ 3-7 小结	89
参考文献	90
第四章 汽轮机热经济性诊断的神经网络模型	91
§ 4-1 引言	91
§ 4-2 BP 网络学习算法分析及比较	92
4-2-1 BP 网络及有关概念的说明	92

4-2-2	单样本训练算法	95
4-2-3	BP 网络的批处理算法	99
4-2-4	BP 网络节点激励函数的分析	101
4-2-5	两种算法的收敛性比较	104
§ 4-3	BP 网络结构的设计及有关参数设置	105
4-3-1	BP 网络输入输出数据的归一化处理	106
4-3-2	BP 网络输入与输出层的设计	108
4-3-3	BP 网络隐层的数目选择	109
4-3-4	BP 网络隐层节点数目的选择原则	109
4-3-5	网络训练的初始连接权及阈值的选择	110
§ 4-4	具有自适应学习率的 BP 网络训练算法	110
4-4-1	BP 网络的学习率分析	110
4-4-2	自适应学习率	112
4-4-3	自适应学习率的 BP 网络训练过程分析及对比	114
4-4-4	采用不同的学习率对训练结果的影响	117
§ 4-5	神经网络在汽轮机热经济性诊断中的应用	117
§ 4-6	小结	119
	参考文献	120
第五章	凝汽器清洁率的监测与故障诊断模型	121
§ 5-1	引言	121
§ 5-2	凝汽器清洁率的监测及预测方法研究	122
5-2-1	凝汽器清洁率的概念	122
5-2-2	凝汽器清洁率的测定	126
5-2-3	管束布置系数及其在凝汽器管束传热效果评价中的应用	130
5-2-4	凝汽器清洁率的预测方法	132
§ 5-3	凝汽器设备及其系统故障诊断方法研究	134
5-3-1	凝汽器典型故障及其征兆	134
5-3-2	BP 网络的训练及其隶属函数的形成	135
5-3-3	诊断实例及对比	137
§ 5-4	小结	139
	参考文献	139

第六章 汽轮发电机组振动故障诊断的神经网络模型	141
§ 6-1 引言	141
§ 6-2 基于人工神经网络的汽轮发电机组振动故障诊断 方法及特点	142
6-2-1 汽轮发电机组振动故障特征	142
6-2-2 基于 BP 网络的汽轮发电机组的故障诊断方法及特点	143
§ 6-3 BP 网络诊断结果模糊性及与常规模糊诊断结果的 对比	151
6-3-1 常规的模糊诊断方法	151
6-3-2 BP 网络诊断的模糊性及与常规模糊诊断的比较	153
§ 6-4 利用不同方向振动信息诊断结果的综合	155
6-4-1 水平与垂直方向的诊断结果分析及对比	155
6-4-2 垂直与水平方向振动故障诊断结果的综合	157
§ 6-5 汽轮发电机组多征兆分级诊断方法	159
6-5-1 机组启停时的振动故障征兆及诊断方法	160
6-5-2 机组带负荷运行过程中振动征兆与诊断方法	163
§ 6-6 BP 网络的故障诊断模型在汽轮发电机组故障诊断 中的应用	165
§ 6-7 小结	167
参考文献	167
第七章 汽轮发电机组故障预测的神经网络模型	169
§ 7-1 引言	169
§ 7-2 BP 网络用于时间序列预测存在的问题	171
7-2-1 BP 网络的预测模型	171
7-2-2 BP 网络存在的问题分析	173
7-2-3 克服 BP 网络存在问题的方法	173
§ 7-3 递推合成 BP 网络及其算法	179
7-3-1 有序系统	179
7-3-2 递推合成 BP 网络及其算法	181
7-3-3 递推合成 BP 网络与常规的合成 BP 网络的比较	185

§ 7-4 递推合成 BP 网络预测特性及性能分析	187
7-4-1 递推合成 BP 网络预测特性分析	187
7-4-2 递推合成 BP 网络预测与其它预测方法的性能比较 ...	194
§ 7-5 递推合成 BP 网络在汽轮发电机组故障预测中的 应用	199
7-5-1 汽轮发电机组故障的可预测性分析	199
7-5-2 汽轮发电机组故障的几种典型趋势的模拟预测及实际 振动预测	200
7-5-3 基于递推合成 BP 网络的汽轮发电机组振动故障的短 期预测	205
§ 7-6 神经网络用于机组故障的自适应预测展望	214
§ 7-7 小结	216
参考文献	218

第一章 绪 论

§ 1-1 火电机组运行状态监测、预测及性能诊断的意义

1. 有利于机组故障的早期发现并及时处理

随着电力工业的迅速发展,越来越多的大型机组陆续投入运行,机组容量的增大使其结构和系统日趋复杂。如何保证这些机组能安全可靠地运行,对国民经济的发展具有十分重要的意义。以往采用数目庞大的二次仪表和记录设备等对现场机组运行状态进行显示和记录、凭经验对机组的可能故障进行判断的传统方式,已经不能适应机组安全经济运行的要求。传感器技术、信号处理技术以及计算机技术的发展,为故障预测与诊断技术的实现奠定了雄厚的基础。借助于故障预测与诊断技术可以实现对故障的早期发现并预测其未来的发展趋势,有利于避免恶性事故的发生,提高机组的运行安全可靠。另外,借助于预测技术,还有利于及时调整运行方式,提高机组的经济性。此外,采用故障诊断技术后使维修更有针对性,从而缩短了停机时间,提高机组的可用率。

2. 为机组由目前的定期维修过渡到状态维修奠定基础

(1) 火电机组目前的维修政策及其存在的问题

机组的状态监测、预测与故障诊断技术是和机组的维修分不开的。安全、经济运行是火电机组运行的主要目标,提高火电机组的可用率以降低发电成本是实现这一目标的主要措施之一,对火电机组进行定期预防性维修是保持其健康水平的一项有效措施,在一定程度上可以提高机组的可用率^[1]。然而,何时应该对机组进行维修亦即维修的周期是多少,机组的制造厂家并未给出实际上

也无法给出一个明确的规定。往往靠运行部门根据机组长期运行的经验,总结出机组的维修周期。长期以来,火电机组运行部门一直采用定期对机组进行预防性维修的政策。而且,定期维修政策在其它行业中也广泛采用^[2]。

但是,由于火力发电厂是一个包括锅炉、汽轮机、发电机及众多的辅助设备的复杂大系统,各种设备的固有工作寿命及运行条件不同,导致其劣化速度不同。这样,在安排其维修周期时需要实行比其固有工作寿命短得多的间隔期来进行定期维修。如果这个周期定得过短,使设备尚未出现异常时便进行维修,必然导致维修“过剩”,造成不必要的人力和财力损失;反之,如果这个周期定得过长,则可能由于设备达到工作寿命极限而未及时更换或维修将使机组出现故障,同样也要产生一定的经济损失。因此,从火力发电的整个系统来看,各个设备采用同一维修周期是不合理的。

另外,从系统故障率的时间分布来看,系统或设备的故障率与时间的关系基本上呈“浴盆”形曲线^[3](如图 1-1)。当采用定期预防性维修之后,其故障率曲线如图 1-2 所示^[4]。由图 1-2 可见,在偶发故障期,设备维修后不仅不利于降低系统的故障率,反而由于对设备的维修,使其重新进入另一个早期故障期,使系统的故障率提高。只有在损耗期,维修才有利于降低设备的故障率。

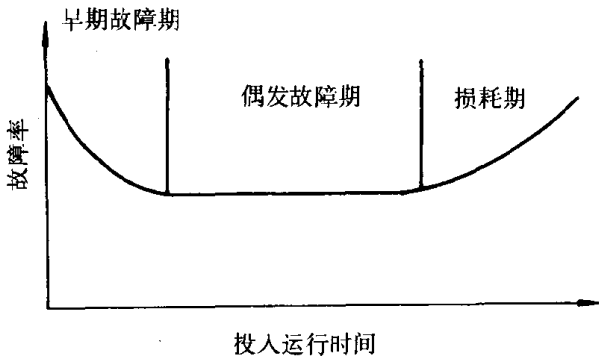


图 1-1 “浴盆”式故障率曲线

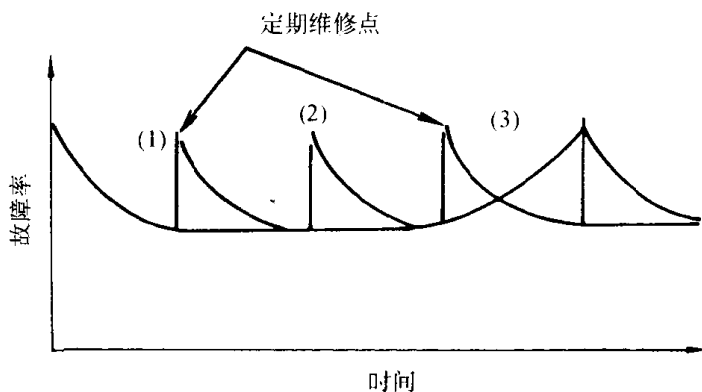


图 1-2 维修对故障率曲线的影响

(1) 早期故障期；(2) 偶发故障期；(3) 损耗期

这种故障现象在我国火电机组的运行中已经反映出来。据文献[5]对 1988~1991 年间我国 200MW、300MW 机组的统计,当大修前机组的等效可用系数 $EAF > 85\%$ 时,经大修后的平均等效可用系数变化情况为:

200MW 机组	+1.10%
300MW 机组	-3.99%

可见,对于运行情况比较好的机组,经大修后,其等效可用系数并无明显提高,有些机组有时甚至还反而降低。

另外,大修投运后连续运行至不同时间内发生第一次故障停机的机组台数占总台数的百分比情况为:

机组	1~5 天内	15 天以内
200MW	16.30%	43.70%
300MW	40.00%	70.00%

这说明目前我国的机组维修水平还不高,在大修前正常运行的机组,经维修后可能反而会人为增加一些故障。

通过上述的讨论可以发现,无论是从保持设备的可靠性,还是从减少维修工作量、节约维修费用、缩短维修时间上考虑,基于时间的定期预防维修方式都有其本质上的缺点。

(2) 火电机组的状态维修及其优点

随着机组状态监测水平提高,在运行着的机组的表面即可以对机组内部的运行状态进行监测^[6],这就为基于状态的维修(the Condition-Based Predictives Maintenance)提供了前提条件。例如,通过监测和分析机组的振动状态,在故障初期即可以为在适当的时间进行维修作好准备。与定期维修方式相反,状态维修不规定维修周期,而是根据设备的状态监测、故障诊断技术及预测技术,来及时发现设备的运行状态并预测其未来的发展趋势,以便确定维修时间。当设备的一个或几个特征参数下降或升高到某种规定的标准值时就进行维修,以消除其潜在的故障,避免故障的进一步扩大。而且,由于采用了故障诊断技术,维修是针对预测出的故障而进行的,因此使维修的针对性增强,有利于缩短维修时间,提高机组的可用率。

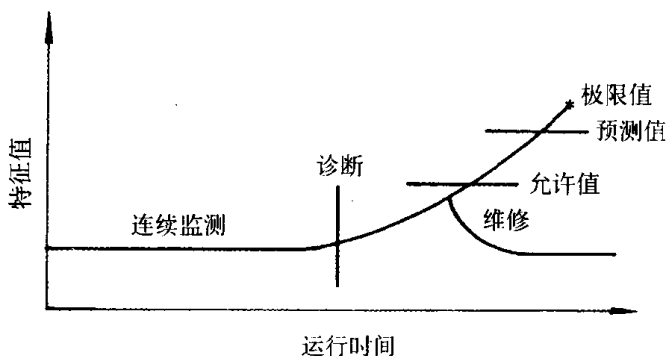


图 1-3 状态监测、预测、诊断与维修间的关系

图 1-3 所示为状态监测、预测及故障诊断之间的关系。由图 1-3 可见,通过监测及预测技术了解设备当时及未来时刻的运行状态,当预测到未来时刻的状态特征值将超过规定值时,借助于故障诊断技术诊断出设备的故障原因及部位,即可有针对性地对机组进行维修。

采用状态维修,可以为机组带来下列好处:

1) 由于通过监测、预测与诊断技术来确定设备的实际运行状态,既可控制因维修过剩而造成的维修费用上升,也可以防止故障于未然。同时还可以使运行人员参与维修决策并确定该维修的设备,使维修更有针对性,避免了长期以来运行人员与维修脱离的局面。

2) 因为不规定维修周期,可以减少材料消耗量和维修工作量,又可以防止因维修而出现的人为故障。

3) 由于减少不必要的停机,可以提高机组的可用率。

机组的状态维修是一项庞大的系统工程,系统中任何一个环节的忽视都将引起整个系统的故障。如何在状态监测、状态预测及故障诊断基础上作出科学的维修决策,也是目前众多学者及运行部门关心的问题,目前已经有大量文献对此进行讨论^[7,8]。但是,采用状态维修的关键是对机组的运行状态进行监测、预测及诊断。而且,监测、预测及诊断的准确度如何直接关系到维修决策的准确性,否则,反而会造成较大的损失。因此,目前的主要工作是如何提高机组状态监测、状态预测及故障诊断的准确性,为状态维修奠定扎实的理论基础。

§ 1-2 汽轮机运行状态预测和故障诊断的研究现状及存在的问题

设备诊断技术的研究开始于本世纪 60 年代。早在 60 年代初,美国的一些公司就开始进行这方面的探索。1962 年在美国召开了一系列会议,如第一届可靠性-维修性会议、第一届故障物理讨论会等。1967 年,美国宇航局(NASA)创导成立了美国机械故障预防组。此后,美国各政府机构和公司广泛成立组织、召开会议进行研究。

随着火电机组监测水平及信号处理技术的提高,特别是随着计算机技术的普及,机组的状态监测与故障诊断方法与系统相继

问世。现将国内外几种比较典型的机组状态监测与故障诊断情况介绍如下^[9-13]：

(1) 涡轮机械状态监测系统 DATM4 (Diagnostic Analysis of Turbo-Machinery)

该系统由美国 BEI (Boyce Engineering International) 公司研制于 70 年代末期的一种基于专家系统的状态监测与诊断系统,其特点在于考虑了涡轮机的负荷、温度、燃油/润滑油的清洁、支持/推力轴承工作情况、叶片共振、油膜振荡、轴线对中等方面的监测、分析与诊断功能,并具有多种参数趋势分析和预报的功能。

(2) 汽轮发电机组状态监测与诊断系统 AID

该系统是由美国西屋电气公司 WHEC 于 1976 年开始研制的。该系统的特点在于由三部分组成:(a) 热性能——可控参数、高中低压缸效率、各缸焓降、传感器的校正与替换等;(b) 振动分析——动态数据分析仪、启停过程振动频谱估计、旋转部件基于专家知识的诊断、动平衡指南、基础与轴振动估计等;(c) 各缸状态分析——汽轮机通流部分、转子部件、给水加热器、蒸汽轴封系统、调节阀、EH 系统、润滑油系统等。该监测与诊断系统也是一种基于专家系统的状态监测与诊断系统,共有近 1 万条规则。其规则的建立大约耗费将近 10 年的时间,而且目前仍在继续完善。该系统具有历史趋势显示功能,但无预报功能。

(3) IQ2000 管理与维修多功能系统

该系统由美国 IRD 公司研制,它包揽了现代工厂企业的现场实时监测、机械状态分析、故障预报与诊断、维修计划与方案、机械设备寿命管理等一系列庞大的模块程序包。

(4) MHMS 机械状态监测系统

该系统由日本三菱重工研制,它采用规则型知识基与框架型