

解决电厂疑难问题的**金钥匙**

汽轮发电机组 振动诊断

QILUNFADIANJIZU
ZHENDONG
ZHENDUAN

张学延 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

解决电厂疑难问题的**金钥匙**

汽轮发电机组 振动诊断

QILUNFADIANJIZU
ZHENDONG
ZHENDUAN

张学延 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《解决电厂疑难问题的金钥匙》系列丛书之一。扼要叙述了汽轮发电机组振动测试、分析方法,振动故障诊断技术以及现场轴系动平衡的理论和策略。在总结转子质量不平衡、热不平衡、动静碰摩、轴系不对中、结构振动、轴向振动、轴系稳定性问题等各种振动故障机理、振动特点的基础上,着重介绍了振动的识别方法、现场诊断和消振经验及技巧。结合 100 例各种容量机组现场振动故障分析和处理方案,进行详细说明,力求使读者更容易理解和掌握机组振动理论和处理方法。本书内容紧密贴近生产实际,具有较高的应用价值。

本书可供电厂从事旋转机械振动专业方面工作的工程技术人员,火电机组运行、调试技术人员以及高等院校相关专业师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮发电机组振动诊断/张学延编著. —北京:中国电力出版社, 2008

(解决电厂疑难问题的金钥匙)

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7796 - 4

I. 汽… II. 张… III. 汽轮发电机组 - 机械振动 - 故障诊断 IV. TM311.014

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 131431 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 11 月第一版 2008 年 11 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 13.75 印张 362 千字

印数 0001—3000 册 定价 34.00 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



序



解决电厂疑难问题的金钥匙

汽轮发电机组振动诊断

近些年来,中国电力工业迅猛发展,截至2007年底,我国电力装机容量已达到7亿kW,年新增装机容量约1亿kW。在这些新建机组中,大型先进发电设备相继投运,新技术不断涌现,电力产业结构升级加快,我国首批国产1000MW级超超临界机组也已投产发电。预计到2012年我国将有270余台600MW级超临界及超超临界机组和百万级国产超超临界机组投入运行,预示着21世纪中国电力工业必将以一个崭新的面貌出现在世界面前。

大容量、高参数机组结构复杂,轴系长度大大增加,在运行中会面临更多新的振动问题。有些机组的汽轮机转子和汽缸采用总装结构,大修周期延长到10年,甚至更长时间,对振动限值的要求更为严格。这些将对汽轮发电机组振动故障诊断及处理水平提出更高的要求。

作者长期致力于转子动力学研究和汽轮发电机组轴系振动故障分析处理工作,参与国家发展和改革委员会重大科技项目攻关,负责和参加数百台机组疑难振动故障处理,积累了丰富的现场振动故障诊断和动平衡经验,在全国各类杂志上发表数十篇高质量学术论文,已成为国内知名的振动故障分析处理专家。

作者集自己工作和研究经验所著的《汽轮发电机组振动诊断》一书,详细阐述了振动测试分析技术、振动故障诊断技术及现场轴系动平衡理论和技巧,在分析各种振动故障机理、振动特点的基础上,着重介绍振动诊断技术,并对典型案例进行了分析。本书集中体现了作者长期以来的研究成果,尤其是一

些典型案例分析，均是作者亲自负责处理的疑难振动故障经总结、归纳、提炼而成，书中内容新颖、逻辑严谨、图文并茂，是一本实用、易懂的好书。该书对轴系振动故障诊断和处理方面的工程技术人员有重要参考价值，将为确保机组长期、安全、可靠运行发挥作用。

值本书出版之际，谨为作序，祝愿本书出版成功，也祝愿中国电力出版事业更加繁荣昌盛。

中国电机工程学会火力发电分会汽轮机专业委员会主任
全国电力行业电站汽轮机标准化技术委员会主任

杨寿敏



前 言



解决电厂疑难问题的金钥匙

汽轮发电机组振动诊断

汽轮发电机组是化石燃料电厂中的核心设备。它能否安全、稳定、可靠地运行,不仅涉及其本身的运行寿命、维护成本和经济性指标,而且关系到广大供电用户的日常生产和生活。汽轮发电机组是高速旋转机械,运行中不可避免地会出现振动。当振动超过限值时,就会影响机组的稳定运行,过大的振动有时还可能造成机组发生灾难性的毁机事故。因此,振动作为衡量机组可靠性的重要安全性指标尤为重要,它是机组设计制造、安装检修和运行维护水平的综合反映。振动监测和控制是电厂安全、经济运行的基础。

当机组发生较大振动时,如何识别振动故障、查找振动原因、及时进行消振处理,是电厂和振动专业人员一直关心的问题。为此,迫切需要掌握机组振动故障诊断与处理技术。

机组的振动故障诊断与处理技术是一门应用工程学科,涉及振动的测量、转子动力学、振动故障诊断和动平衡技术等诸多领域。20世纪80年代以来,在国内外众多高等院校、科研机构、电力试验研究所、专业化公司以及广大电厂的共同努力下,该学科得到迅速发展,取得了长足的进步。应用振动故障诊断与处理技术,已成功地解决了机组运行中出现的绝大多数振动问题,在保证电厂安全运行方面发挥了重要作用。然而,引起振动的因素很多,往往造成有些机组振动故障的识别相对困难,认识上容易产生争议。此外,对机组的一些振动机理仍没有彻底搞清。事实上,直到当前,现场仍有一些机组的“疑难”振动问题的处理花费了大量的时间和费用,有时还走弯路,这些其实都是对振动故障认识不够或采取的方法不妥造成的。

因此，机组振动故障诊断与处理技术仍需要在理论研究和工程实践中不断发展和完善。

本书主要是为推广火电厂汽轮发电机组轴系振动监测、分析和处理的实用技术而编写的，目的是为了更地了解汽轮发电机组以及电厂其他设备运行中普遍存在的各种振动故障、产生的原因和重要的振动特征，以及消除和控制振动的基本方法。

书中阐述了机组振动测试、分析方法和振动故障诊断技术，以及现场轴系动平衡理论和技巧，在分析各种振动故障机理、振动特点的基础上，着重介绍振动诊断技术及其应用方法和现场经验，结合现场振动故障分析处理实例，力求读者能够容易理解和方便掌握。

全书共分十二章。第一章简要地介绍了旋转机械振动测试和分析技术，主要包括振动测试用的一、二次仪表，振动特征分析和振动评价标准。第二章概括了振动故障诊断技术，介绍了振动的分类、影响机组振动的因素、振动故障诊断的振动试验、基于频谱分析的振动故障诊断技术，以及振动故障诊断基础和现场振动问题的原则处理方法。第三章是转子现场动平衡技术，重点介绍轴系平衡的特点及高效动平衡的策略和技巧。第四章描述的是转子的质量不平衡故障，包括故障来源、不平衡形式、不平衡振动特征及不平衡故障的识别与诊断。第五章介绍转子热不平衡故障，阐述了汽轮机转子和发电机转子产生热弯曲的机理、振动特点及诊断方法。第六章是机组动静碰摩故障，给出转子动静碰摩的机理、振动特征和识别方法。第七章论述的是转子和轴承不对中故障，介绍不对中故障机理和振动特征。第八章首先对轴系振动稳定性理论进行概述，然后给出现场最常发生的润滑轴承油膜不稳定和蒸汽激振故障的机理和振动特征。第九章是结构方面的振动故障，包括影响结构振动的各种因素，结构共振、结构动刚度不足引起的振动特点和

处理方法等。第十章主要阐述轴向振动产生的原因，轴向振动的消除和控制方法。第十一章概述了转子不对称、转子横向裂纹、机械松动、拍振和电气冲击引起的振动特点和识别方法。第十二章介绍现场常出现的振动测量系统机械和电气干扰故障的原因及诊断方法。

在第四章到第十二章的振动故障分析中共列举 100 个包括大、中、小型机组振动分析和处理实例，以加深读者对故障特征和诊断、处理技术的认识。由于很多故障相互联系，有一定的因果关系，很难做到单独分析，因此有些案例中提到的问题是一些综合因素共同作用的结果，如转子热弯曲、联轴器连接偏差与质量不平衡，联轴器连接偏差与轴系振动稳定性，动静碰摩与转子热弯曲，机械松动与共振等，它们都有直接或间接的联系。

书中所列的振动分析和处理案例，绝大多数是从西安热工研究院近 20 多年来处理过的千余台机组的振动故障中挑选出来的，还有少部分是从国内外公开发表的刊物和资料上选取的，这些故障分析和处理案例尽可能地反映书中所阐述的振动诊断技术。

能完成本书的写作，要感谢国内众多电厂给予西安热工研究院和作者本人工作上的大力支持和协助。他们的信任使我们有机会参与处理大量国内机组振动故障，尤其是一些疑难振动故障的分析和处理，这些现场实践使我们受益匪浅。特别要感谢重庆发电厂、广西合山电厂、太原第一热电厂、新疆红雁池第二发电厂、内蒙古伊敏发电厂、黑龙江鹤岗发电厂、安徽田家庵发电厂、辽宁铁岭发电厂、江苏张家港沙洲电厂、甘肃靖远电厂等单位长期以来对作者的信任和支持。

黄秀珠、施维新、寇胜利、王延博、张卫军、葛祥、杨青、何国安等一起工作的同志共同参与了本书介绍的振动故障分析和一些诊断实例的处理工作，在此，对他们的辛勤劳动表示深

切谢意。

限于作者的水平和经验，书中难免会有缺点和不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2008年7月



目 录



解决电厂疑难问题的金钥匙

汽轮发电机组振动诊断

序

前言

第一章 振动的测量和分析技术	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 振动的表示	(4)
第三节 振动测量用传感器	(6)
第四节 振动监测常用仪器	(12)
第五节 振动数据分析	(14)
第六节 振动在线监测和故障诊断系统	(23)
第七节 振动的评价标准	(29)
第二章 振动故障诊断和处理技术	(37)
第一节 机组振动的分类及异常振动特征	(37)
第二节 影响机组振动的因素分析	(41)
第三节 机组故障诊断目的的振动试验	(44)
第四节 机组振动故障诊断方法	(50)
第五节 振动故障诊断的基础	(56)
第六节 机组振动故障汇总和处理方法	(59)
第三章 轴系的现场动平衡技术	(65)
第一节 转子动平衡概念	(65)
第二节 质量不平衡的类型	(68)
第三节 单转子的平衡方法	(69)
第四节 轴系平衡方法	(74)
第五节 现场轴系高效动平衡的策略与技巧	(76)
第四章 质量不平衡引起的振动故障诊断和处理	
实例分析	(83)
第一节 质量不平衡的来源	(83)

第二节	质量不平衡引起的振动特征	(84)
第三节	质量不平衡振动的诊断和识别	(86)
第四节	类似质量不平衡振动特征的其他故障 区分	(87)
第五节	实例分析	(89)
第五章 转子热不平衡引起的振动故障诊断和处理		
	实例分析	(156)
第一节	发电机转子的热弯曲	(156)
第二节	汽轮机转子的热弯曲	(163)
第三节	转轴扭矩改变而产生的联轴器不平衡	(166)
第四节	实例分析	(167)
第六章 动静碰摩引起的振动故障诊断和处理		
	实例分析	(199)
第一节	动静碰摩的种类	(199)
第二节	动静碰摩的原因分析	(200)
第三节	动静碰摩引起的振动现象、机理和特征 ..	(201)
第四节	机组常发生动静碰摩部位的分析	(204)
第五节	动静碰摩的识别和对策	(209)
第六节	实例分析	(212)
第七章 转子不对中引起的振动故障诊断和处理		
	实例分析	(257)
第一节	转子不对中的分类和产生原因	(257)
第二节	不对中引起的振动特征	(259)
第三节	不对中故障的诊断和对策	(260)
第四节	实例分析	(261)
第八章 轴系振动稳定性故障的诊断和处理实例分析 ..		
第一节	轴系振动稳定性简述	(284)
第二节	轴承自激振动	(286)
第三节	蒸汽激振	(288)
第四节	实例分析	(292)

第九章 结构振动故障的诊断和处理实例分析	(326)
第一节 影响结构振动的基本因素	(326)
第二节 机组常见的结构振动故障原因分析	(327)
第三节 结构振动故障的对策	(330)
第四节 实例分析	(330)
第十章 轴承座轴向振动故障的诊断和处理实例分析 ...	(368)
第一节 轴向振动的原因分析	(368)
第二节 轴向振动的控制和消除	(372)
第三节 实例分析	(374)
第十一章 其他故障引起的振动诊断和处理实例分析 ...	(385)
第一节 其他故障引起的振动诊断和处理	(385)
第二节 实例分析	(392)
第十二章 振动测量系统故障的诊断和处理实例分析 ...	(403)
第一节 振动测试系统的机械干扰	(403)
第二节 振动测试系统的电气干扰	(405)
第三节 振动测试系统干扰的识别和对策	(407)
第四节 实例分析	(408)
参考文献	(423)



第一章

振动的测量和分析技术

当设备的内部发生异常时,一般情况下都会随之出现振动大小及其性质的变化。通过对振动的测量和特征分析,可以评估设备的运行状态,并对已出现明显振动的设备进行故障诊断,及早制定应对措施。所以,旋转机械设备的振动监测在电厂的运行和维护中受到广泛重视。

本章将主要描述振动的测量以及振动数据分析方法,介绍电厂常用的离线和在线振动监测仪表,以及振动在线监测和振动故障诊断系统,并给出机组振动评价标准。



第一节 概 述

电厂运行中的设备和结构普遍存在机械振动,它是物体(质点)或设备的某种状态随时间往复变化的一种物理现象。几乎在电厂的任何地方都能发现振动的踪迹,如汽轮机、发电机、风机、水泵等旋转机械的振动,轴承座、汽缸、发电机定子、凝汽器等固定结构的振动,汽、水管道及热交换器的振动,甚至厂房、混凝土基础、横纵梁等土建结构的振动。

振动状态是设备设计制造、安装检修和运行维护水平的综合反映。振动水平是衡量机械设备能否持续可靠运行的重要指标。

通常情况下,振动会减少设备的使用寿命,有些情况下能够造成设备损坏,甚至发生灾难性事故。尽管运行中的设备总



是不可避免地存在着振动,但并非所有的振动都会影响设备的运行,一般根据振动的量值大小来判断其对设备的危害程度。如果振动数值小于一定的限值(标准),则认为该振动是正常的,不会对设备的运行产生明显的危害,设备可以安全稳定运行。然而,当振动超过限值时,就可能会产生包括机组动静部分碰摩、部件的疲劳损坏、连接或紧固件的断裂与松脱、基础和周围的建筑物损坏以及机组运行的经济性降低等在内的危害。此外,过大的振动及其引发的噪声还会影响运行人员的身体健康。

高速旋转机械设备往往较其他一些低速旋转和非旋转设备更容易产生振动,特别是汽轮发电机组。此外,汽轮机的高参数蒸汽产生的热效应和发电机的电气效应也会增加出现振动的概率,并可能导致振动强度加剧。

机组运行中强烈振动的出现往往伴随着事故的发生。过大的振动会引起部件的松动、断裂或脱落,进一步造成更严重的振动以及部件失效和飞脱,最终可能导致灾难性事故的发生。这些事故通常是在很短的数秒或数分钟内发生的。

一个典型的例子是某电厂一台 200MW 机组在超速试验时发生的严重毁机事故。超速试验期间,机头试验人员听到“轰”的一声响,随即有人被汽浪吹倒,接着碎片像雨点似散落在机组周围,机头冒烟起火,事故现场一片狼藉。整个事故过程只有几秒钟。事故后检查发现,整个轴系断成 13 段,其中低压转子和发电机转子各断成 3 段。发电机后轴承外伸轴飞出,打穿锅炉房,飞离原位 40 余米。这次事故造成了严重的经济损失,据分析,事故原因是由于机组严重超速,轴系产生大的质量不平衡引发轴系损坏。

另一个例子是某 50MW 机组运行中,因励磁机风扇叶轮和与之紧配合的转轴突然脱开产生大不平衡强烈振动,引发发电机轴承定位销剪断,造成断油烧瓦,停机降速通过发电机临界转速时振动加剧,导致发电机、励磁机部件进一步损坏。图

1-1 是损坏的励磁机和发电机轴承情况。

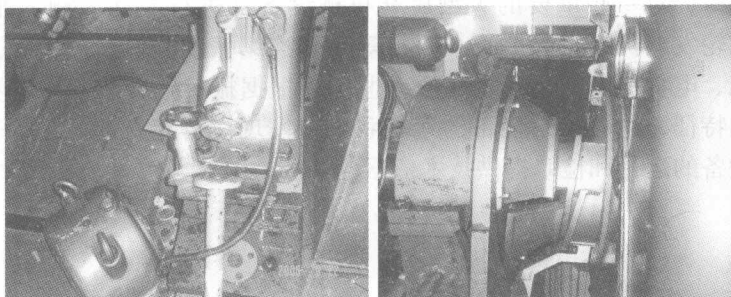


图 1-1 某 50MW 机组事故中造成励磁机轴承飞落和发电机轴承油挡断裂

振动疲劳也会引起汽轮机叶片的损伤和断裂,进而造成轴系振动状态的恶化。图 1-2 所示的是某 330MW 机组低压第 4 级动叶断裂和损伤情况。

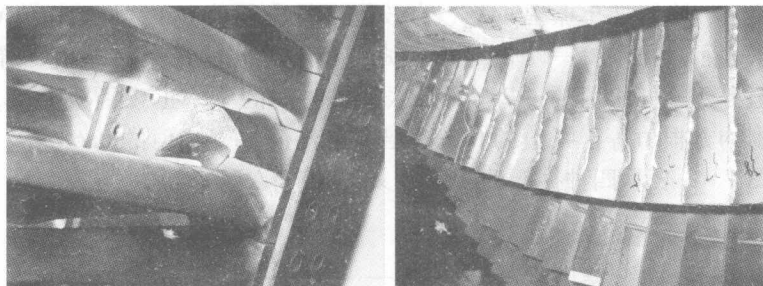


图 1-2 某 330MW 低压第 4 级动叶断裂和损伤

虽然较大的振动对机组的安全运行会产生不利影响,但也可利用振动的存在和发展来诊断机组已出现和潜在的问题,保证在机组发生严重损坏之前提供早期报警,及时采取有效方法进行预防。相比于旋转机械设备诊断技术常采用的油液分析和表面温度测量分析方法,由于振动诊断技术具有多参数性、多维性、可传递性和可实现性等优点,因而得到了更为广泛的应用,成为机组故障诊断中最主要的方法。

振动的测量和数据分析是振动故障诊断的前提和基础。在电厂,对一些重要的大型旋转机械设备都进行振动监测。如,汽轮发电机组、锅炉给水泵组等采用连续振动监测,而锅炉风机、电动机等则采用定期振动监测。根据振动的变化趋势和振动特征,能够了解设备的运行状况,发现设备存在的问题,为设备的运行和检修提供技术依据。



第二节 振动的表示

机械振动通常以其振幅、频率和相位来描述,它们是构成振动的三个基本要素。

一、振幅

振幅表示振动或动态运动的幅度,它是表示机组振动严重程度或烈度的一个重要指标。振幅可用峰—峰值(双振幅) X_{p-p} 、峰值(单振幅) X_p 、有效值(均方根值) X_{rms} 及平均值 $\bar{X}$ 来表示。振动峰—峰值等于正峰和负峰之间的最大偏差值,峰值等于峰—峰值的1/2。如果振动是时间的单一正弦函数关系,则均方根值等于峰值的0.707倍,平均值等于峰值的0.637倍。图1-3表示四种振幅的不同含义。

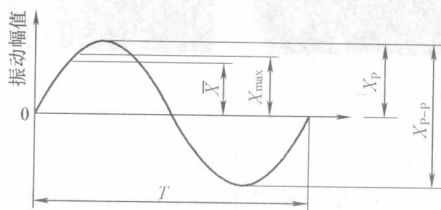


图1-3 正弦函数振幅的各种定义图示

如果振动信号中含有一种以上频率的振动分量,则上述振动均方根值、平均值与振动峰值换算会产生较大的误差,此时振幅的峰—峰值、峰值、有效值和平均值应通过具有相应功能

的振动仪表测量得到。

振动幅值通常采用振动位移、速度或加速度值为度量单位。在实际的振动测量中,除特别注明外,一般振动位移以峰—峰值表示,单位 μm 或 mm ;而振动速度用均方根值表示,单位 mm/s 。

二、频率

振动频率是指振动物体在单位时间 (1s) 内振动的周期数,为周期的倒数。它反映振动发生得快慢,是分析振动原因的重要依据。根据振动频率分布可以初步查明振动的“根源”。

振动频率可采用赫兹 (Hz 或 $1/\text{s}$)、周/分钟 (c/min)、转/分钟 (r/min) 为度量单位,或以相对于转速的频率为度量单位,如一倍转速频率 (1X)、半倍转速频率 ($1/2\text{X}$)、二倍转速频率 (2X)、三倍转速频率 (3X) 等。

振动频率与转速、周期的关系为: 频率 f (Hz) = 转速 n (r/min) / 60; 频率 f (Hz) = $1/\text{周期 } T$ 。

以单位时间振动角度表示的振动频率称为圆频率或角频率,即物体在 1s 内转过的弧度值,用 ω_f 表示,它为振动频率的 2π 倍,关系式为 $\omega_f = 2\pi f$, 单位为 rad/s 。

三、相位

振动相位 (角) 是由键相信号与选频振动信号构成的相对关系,它是转子或轴承座某一瞬间的振动选频信号与轴上某一固定标志的相位差。相位的度量单位为度 ($^\circ$),通常振动相位在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围之间变化。

一倍频 (基频) 振动的相位在振动分析中十分重要,它不仅反映了不平衡分量的相对位置,在动平衡中必不可少,而且在故障诊断中也能发挥重要作用。

对于以正弦函数形式运动的周期性振动 (也称为简谐振动),由于振动的位移、速度和加速度间存在导数关系,因此,它们之间的相位也有一定的关系,即速度超前位移 $\pi/2$ (90°) 相位角,加速度超前速度 $\pi/2$ (90°) 相位角,超前位移