

电力试验技术丛书

丛书主编 文伯瑜 姜龙华

汽轮机试验

江苏省电力公司技术中心 刘凯 主编
江苏省电力试验研究院有限公司

546521.576232123223152

002455026



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力试验技术丛书

丛书主编 文伯瑜 姜龙华

汽 轮 机 试 验

江苏省电力公司技术中心 刘 凯 主编
江苏省电力试验研究院有限公司
邵关兴 彭 达 蔡帼英 主审



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为了总结多年来我国电力试验的经验,促进我国电力试验水平的提高,中国电力企业联合会电力试验研究分会和中国电力出版社组织编写了《电力试验技术丛书》。本丛书是根据原国家电力公司电安生[1996]430号文《关于电力工业技术监督工作规定》的要求而编写的,具有科学性、实用性、先进性、权威性。

《汽轮机试验》是本丛书之一。本书从工程应用角度出发,介绍了与电站汽轮机有关的三类重要试验,即热力性能试验、振动试验和叶片试验,并介绍了这三类试验的基本原理、试验标准的理解 and 应用、试验方法、关键技术、试验常用的仪器仪表、试验数据的处理、试验结果的计算和分析等。同时,为便于读者更好地理解书中阐述的内容,文中列举了大量由作者在多年工作实践中具体处理过的工程实例供参考。

本书可供电力、石油、化工、冶金等行业的从事汽轮机热力性能试验、振动试验和叶片试验的专业技术人员阅读,也可供上述行业中的技术管理、运行、检修专业技术人员阅读,对于高等院校动力工程专业的学生有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机试验/刘凯主编;江苏省电力公司技术中心,江苏省电力试验研究院有限公司. —北京:中国电力出版社,2005
(电力试验技术丛书)

ISBN 7-5083-3043-9

I. 汽... II. ①刘... ②江... ③江... III. 蒸汽透平-实验 IV. TK26-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 011186 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005年5月第一版 2005年5月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 23.25印张 526千字
印数 0001—3000册 定价 37.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

电力试验技术丛书 编委会

主 任 赵 鹏

主 编 文伯瑜

副主编 姜龙华

委 员 (按姓氏笔划为序)

王启全	王海林	平德明	卢昌华	史更林	白云庆
白立江	冯亚民	巩学海	吕 政	刘韶林	江学容
杨伟光	李 晨	吴文宣	余维平	张大国	张 方
张怡荣	张俊生	张勇刚	苑立国	卓伟光	周本国
周 宏	郑 松	赵 伟	赵炳松	施 冲	贾玉堂
徐润生	黄迪威	康 健	傅 伟	蔡庆宏	潘言敏

序

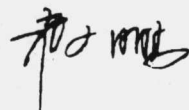
电力试验研究是经济建设尤其是电力工业发展中一项不可或缺的事业。中外电力事业的发展，均离不开电力试验研究人员的智慧和辛勤工作。新中国成立后，尤其是改革开放以来，随着电力工业的发展，我国电力试验研究事业取得了长足的进步，电力试验研究队伍不断扩大，试验研究成果层出不穷，极大地推动了电力工业的快速发展。

目前我国各地区均拥有自己的电力试验研究机构，从事电力试验研究的工程技术人员超过 10000 人。这支队伍的文化层次也从解放初期的以中专、大专毕业生为主，提高到今天的以大学毕业生、硕士生和博士生为主。更重要的是，这是一群热爱自己的事业、勤于钻研、勇于实践的勤奋劳动者。前后几辈人相互学习，长期工作实践，积累了大量试验研究工作经验。这是他们用汗水、心血以至生命换来的、值得用文字记录并传之于后世的宝贵经验。

随着电力体制改革的不断深化，使电力试验研究事业进入了竞争激烈同时又是历史上最好的发展时期。电力试验研究同行们愿意把自己的经验无私地奉献给广大读者，就是为了促进我国电力试验研究事业的进步与飞跃，促进我国电力工业的发展与兴旺，进而促进我国国民经济的增长与繁荣。

本着各取所长、共同提高的初衷，我们经过长时间的准备，编辑出版《电力试验技术丛书》，相信它一定会给读者带来启发、思考和收益。

华北电力科学研究院有限责任公司总经理
中国电力企业联合会电力试验研究分会会长



2003 年 12 月

前言

我国目前装机总容量为 3.5 亿 kW，居世界第二。随着三峡电站机组的分批投入运行和西电东送工程的推进，到 2010 年全国性的大电网将初步形成。全国性电力系统运行的动态品质、安全稳定和经济性的改善与提高成为电力科技工作者肩负的重要责任。

为了总结多年来我国电力试验的经验，促进我国电力试验水平的提高，中国电力企业联合会电力试验研究分会和中国电力出版社决定组织编写一套《电力试验技术丛书》，以满足国内各电力试验研究院（所）、电厂、供用电企业、电力基建单位及大专院校、科研院所对专业技术书籍的迫切需要。

本系列丛书的内容主要是根据原国家电力公司电安生 [1996] 430 号文《关于电力工业技术监督工作规定》的要求而确定的。该文中规定，“电力技术监督工作应以质量为中心、以标准为依据、以计量为手段，建立质量、标准、计量三位一体的技术监督体系，依靠科学进步，采用和推广成熟、行之有效的新技术、新方法，不断提高技术监督的专业水平”。因此，本套丛书涵盖的内容应包括电能质量、金属、化学、绝缘、热工、电测、环保、继电保护、节能等，并对设备的健康水平及其安全、经济运行方面的重要参数、性能与指标进行监督、审查、调整和评价。本丛书共分 15 册。

丛书具有科学性、实用性、先进性、权威性。作者在写作过程中树立了精品意识和创优信念。

特别感谢中国电力企业联合会电力试验研究分会，全国三十二个试验研究院（所、技术中心）的领导，我们的分册主编主要由这些单位的技术专家担任。

特别感谢中国电机工程学会在组织编写中给予的大力支持。

丛书主编

文伯瑜

丛书副主编

姜石华

2003 年 12 月 1 日

本书前言

为了满足国内科研院所和电力相关部门对电力试验技术的迫切需求,中国电力企业联合会电力试验分会和中国电力出版社组织编写了《电力试验技术丛书》。本书为该丛书中的《汽轮机试验》分册,由刘凯担任主编。

本书共分三篇。

第一篇 汽轮机热力性能试验。主要内容是从工程应用方面阐明汽轮机热力性能试验技术的原理和方法,对各类热力性能试验规程或标准的适用范围及技术要点进行分析,提出实施热力性能试验过程中的关键技术难点及解决方法。

第二篇 汽轮机振动试验。主要内容是从工程应用方面阐明汽轮机振动试验技术的原理和方法,系统地介绍了机组振动测量和振动数据分析处理技术,振动试验方法、转子及轴系现场动平衡,振动故障的诊断以及常用仪器设备的性能及使用等。

第三篇 汽轮机叶片试验。主要内容是从工程应用方面阐明汽轮机叶片试验技术的原理,介绍了叶片振动特性的测量、分析及评价方法,常用的叶片振动测试仪器及系统,叶片和叶轮轮系振动频率的调整方法及相关实例等。

第一篇由刘凯(第一章、第三章、第六章),郭振宇(第一章、第三章、第五章),姚永灵(第二章、第七章),卢承斌(第四章、第五章、第七章),周珏(第七章)五位同志负责编著。由电力行业资深专家邵关兴高级工程师审稿。

第二篇由徐基琅(第八章、第十章、第十一章),胡建欣(第九章、第十二章)两位同志负责编著。由电力行业资深专家彭镒教授级高级工程师审稿。

第三篇由吴曰舜同志负责编著。由电力行业资深专家蔡幅英高级工程师审稿。

在此,本篇的编写人员对邵关兴高级工程师、彭达教授级高级工程师、蔡幅英高级工程师的悉心指导致以真诚的谢意。

在组织本书的编写过程中,得到了丛书主编文伯瑜教授级高级工程师的悉心指导,在此,本篇的编写人员对丛书主编文伯瑜教授级高级工程师表示衷心的感谢。

限于作者的能力有限,文中难免会出现问题和不足,真诚地希望百忙之中阅读本书的专家和学者不吝指正。

编者

2004年10月

目 录

序	
前言	
本书前言	

第一篇 汽轮机热力性能试验

第一章 绪论	3
第一节 概述	3
第二节 汽轮机热力性能试验的定义、目的与范围	5
第三节 汽轮机热力性能试验的分类	7
第四节 汽轮机热力性能试验的现状与发展	10
第二章 测量仪表及测量方法	12
第一节 测点布置	12
第二节 压力测量	16
第三节 温度测量	18
第四节 流量测量	20
第五节 电功率测量	25
第六节 其他测量	26
第七节 数据采集系统	26
第八节 数据处理	29
第三章 热力性能试验方法	31
第一节 试验标准和规程	31
第二节 基本原则和技术要点	37
第三节 全面性热力性能试验	48
第四节 常规性和特殊类型的热力性能试验	56
第四章 试验结果的计算方法	59
第一节 概述	59

第二节 试验热耗率计算	62
第三节 焓降效率计算	67
第五章 试验结果的修正	73
第一节 试验结果修正的原则	73
第二节 第一类修正计算	75
第三节 第二类修正计算	77
第四节 简化试验结果的修正	78
第五节 汽轮机通流效率的修正	81
第六章 试验结果的不确定度分析	85
第一节 概述	85
第二节 常用基本术语及其概念	86
第三节 汽轮机热力性能试验不确定度的主要来源分析	90
第四节 不确定度的评定	91
第五节 汽轮机热力性能试验中的测量不确定度评价原则	92
第六节 主要测量参数不确定度的确定	93
第七节 不确定度数值分析计算方法	101
第七章 中间再热式汽轮机性能试验算例	114
第一节 试验概述	114
第二节 试验运行工况下性能的计算	116
第三节 试验结果修正到设计运行状态	123
第四节 试验结果不确定度的评定	135

第二章 汽轮机的振动试验

第八章 振动学基础知识	141
第一节 振动及振动系统	141
第二节 周期振动与简谐振动	142
第三节 振动的合成与分解	145
第四节 单自由度系统的自由振动	150
第五节 单自由度系统的强迫振动	153
第六节 自激振动	158
第九章 振动测试技术及仪器	162
第一节 振动测试内容	162

第二节	传感器	163
第三节	测振仪器及现场振动试验	168
第四节	振动测试方法及数据处理	171
第十章	振动分析基础	178
第一节	转子振动	178
第二节	转子的动力特性	181
第三节	振动监测的基本参数及相关的图形	185
第四节	滑动轴承的基本特性	196
第五节	振动评价标准	200
第十一章	现场振动故障诊断	206
第一节	概述	206
第二节	振动故障分类及故障特征汇总	207
第三节	现场振动故障诊断的方法	210
第四节	支撑系统的刚性不足与共振的诊断	215
第五节	转子质量不平衡的诊断	219
第六节	机组中心不良的诊断	229
第七节	转轴动静碰磨的诊断	232
第八节	轴承座轴向振动的诊断	240
第九节	油膜失稳和蒸汽激振的诊断	242
第十节	两倍频振动的诊断	252
第十一节	振动故障诊断实例	256
第十二章	汽轮发电机组现场动平衡	260
第一节	现场动平衡的意义、范围和条件	260
第二节	动平衡的基本原理和基本概念	261
第三节	刚性转子的平衡	266
第四节	汽轮发电机组现场动平衡	268

第五篇

汽轮机叶片试验

第十三章	绪言	283
第一节	概述	283
第二节	汽轮机叶片的设计与运行	285
第三节	叶片的基本结构与强度	288

第十四章	叶片振动的基本知识	297
第一节	运行叶片的激振力	297
第二节	共振条件与 K 值	298
第三节	叶片的振型	299
第四节	叶片强度安全评价标准	302
第十五章	叶片振动特性测量	307
第一节	叶片静态频率测量方法	307
第二节	轮系振动测量方法 (模态法)	311
第三节	叶片动频率测量方法	332
第十六章	常用叶片振动测试仪器及系统	334
第一节	概述	334
第二节	两个垂直振动合成法的测量仪器及系统	334
第三节	频谱分析法的测量仪器及系统	336
第四节	模态分析法的试验仪器及系统	338
第十七章	叶片振动特性的评价	340
第一节	叶片分散率及分散率的评价	340
第二节	调频叶片	340
第三节	轮系振动 (临界转速与安全指标)	342
第四节	整圈连接叶片	343
第十八章	叶片及轮系振动的调整	345
第一节	叶片低频振动频率的调整	346
第二节	叶片高频振动频率的调整	350
第三节	叶片切向 A0 型振动频率的调整	352
第四节	其他类型叶片 (轮) 振动频率的调整	352
第十九章	叶片典型事故分析	355
第一节	综述	355
第二节	叶片损坏的原因	357
	参考文献	360

电力试验技术丛书 • 汽轮机试验 •

第一篇

汽轮机 热力性能试验

刘 凯 郭振宇 姚水灵 卢承斌 周 珏 编著

第一章

绪 论

第一节 概 述

汽轮机是通过蒸汽在叶栅通道内膨胀做功，将热能转变为机械能的一种旋转式原动机。自从 1883 年，瑞典工程师 Laval 制造了世界上第一台工业汽轮机以来，汽轮机已广泛应用于世界各地的能源、化工、冶金、船舶等工业领域。

根据热力学原理，实现能量的转换是有代价的，提高能量的转换效率，始终是汽轮机设计和制造技术研究追求的目标。汽轮机发展的实践表明，单纯地用理论分析和计算方法来提高汽轮机组的性能是不可能的，而理论研究和试验研究总是密不可分、相辅相成的。因此，用试验研究的方法来解决汽轮机设计、制造、安装、调试、运行、维护中的一些基本问题，具有十分重要的意义。汽轮机热力性能试验就是这样的一种试验研究手段。

汽轮机热力性能试验的研究对象就是汽轮机的热力性能，这些性能包括热耗率、热效率、功率等。热力性能试验是随着汽轮机的发展而发展起来的一种特殊的工业试验。热力性能试验研究就是通过试验的方法对汽轮机组的热力性能进行研究和分析。如何准确地获取汽轮机组的热力特性是热力性能试验技术研究的主要方向，在保证取得高精度度试验结果的同时，降低试验成本是热力性能试验技术研究的另一个方向。汽轮机热力性能试验对汽轮机设计和制造技术的发展和进步、汽轮机组的运行优化、状态监测及评估、技术改造、经济性和安全性评价等方面起到重要的作用。汽轮机热力性能试验技术研究的主要内容有试验标准和规程、试验方法、测量技术和方法、试验结果计算方法、不确定度分析、试验结果的分析、试验报告编写等。

汽轮机热力性能试验的重要性表现在以下几个方面：

首先，通过热力性能试验获取汽轮机组的热力性能数据，对汽轮机的设计和制造技术的定型、改进和完善起着辨识、验证、鉴定的作用。国内外的汽轮机设计和制造技术发展表明，对新型汽轮机样机进行完整的高精度度水平的热力性能试验和调整工作，可以缩短从首台样机到定型批量生产的周期，并可以为消除机组设备设计和运行性能的缺陷提供依据，达到或提高其设计的热力性能指标。通过对热力性能试验所得到的有关汽轮机各汽缸级段的热经济性数据进行分析，可以判断出汽轮机的高压缸、中压缸和低压缸通流部分空气动力学的完善程度。通过这些试验数据，还可为研制更大功率汽轮机奠定基础。

国产汽轮机通流部分技术改造的发展过程印证了热力性能试验的这一重要作用。1987年,联合国在中国开展三排汽 200MW 汽轮机组低压缸改造援助项目,由东方汽轮机厂负责实施。经过四年左右的设计开发和一系列包括热力性能试验在内的试验研究工作,1992年在焦作电厂 1 号机进行了国内第一次汽轮机通流部分改造(进行低压前四级的改造)。随后,汽轮机通流部分改造在全国电力系统全面推广应用。东方汽轮机厂 1996 年 10 月又根据热力性能试验数据对高、中、低压缸进行优化,第一台三缸全改和低压缸优化机组分别在徐州发电厂 6 号、7 号机上实施。随后,200MW 汽轮机通流部分改造技术经过近十年的设计开发和推广应用已基本成熟起来,取得了令人瞩目的效果。改造发展过程见表 1-1。汽轮机热力性能试验对汽轮机技术发展可谓功不可没。

表 1-1

200MW 机组改造进程简介

时 间	机 组	机组容量 (MW)	改造内容	试验单位	改造单位
1992.5	焦作发电厂 1 号	200	低压缸前四级	电力部西安热工研究院	东方汽轮机厂
1998.1	徐州发电厂 6 号	200	三缸全改	江苏省电力科学研究院	东方汽轮机厂
1999.1	徐州发电厂 7 号	200	三缸全改、低压缸优化	江苏省电力科学研究院	东方汽轮机厂

其次,热力性能试验对机组的安装水平、调试质量、维护、技术改造,以及新技术的推广应用起到重要的评价和鉴定的作用。性能验收试验(或称为性能鉴定试验、性能考核试验)是热力性能试验的一个重要类型,它是汽轮机组全面性的热力性能试验,其范围几乎覆盖了汽轮机岛的所有热力设备,能够提供汽轮机组绝大多数的热力特性数据。验收试验的主要目的是对汽轮机制造商提出的保证值进行严格的鉴定,同时对新机组(或有重大技术更新的机组)的热力性能进行全面的评价。各种重要热力设备的技术改造,如:汽轮机通流部分技术改造、电动给水泵改为汽动给水泵、凝汽器改造等,都需通过热力性能验收试验对改造的结果进行评价和鉴定。

热力性能试验对运行中的汽轮机组的节能降耗工作至关重要。性能试验是把汽轮机组作为一个黑箱来进行研究,也就是说,可以在不停机、不揭缸的情况下,通过在线试验研究,获得能真实反映汽轮机组的运行状态和热力性能数据,寻求最优运行参数和方式,实现对汽轮机组的运行方式进行指导。目前,许多国内外研究机构已经根据机组的基准试验结果,开发出一些汽轮机运行优化管理软件。

热力性能试验还是开展机组的状态评估和寿命管理的重要技术手段。通过热力性能试验获得汽轮机组的综合热力性能指标,可以对机组热力性能劣化程度进行评估,结合有关安全性、可靠性评价,以提出检修、技术改造或者延长服役期的建议。

总之,汽轮机热力性能试验对准确掌握汽轮机热力特性,促进汽轮机技术的发展具有重要的作用。只有认真研究和解决汽轮机热力性能试验中出现的各种问题,才能提高试验的精确度,促进热力性能试验技术的发展。本篇将围绕汽轮机热力性能试验的标准和规程、试验方法、仪表及测量方法、计算和修正方法、不确定度分析等进行阐述,针对热力性能试验过程中出现的各种问题,结合长期开展汽轮机热力性能试验的实践经验,提出有

关建议和方法,以促进热力性能试验规范有序的发展,提高热力性能试验技术水平。

第二节 汽轮机热力性能试验的定义、目的与范围

汽轮机热力性能试验是在特定的热力循环系统中,用热工测量的方法获取汽轮机在额定运行工况下热力特性的一种工业试验。

汽轮机的热力特性是指反映汽轮机在特定的热力循环系统中能耗水平,以及附属设备系统完善程度的一系列热力学指标。汽轮机组是由许多附属设备及系统组成的有机整体,其热力特性取决于热力循环系统中各主、辅设备及系统热力特性的综合。这些主、辅设备及系统包括:配汽机构、通流部分、回热系统、凝汽器、各类泵等热力循环设备及系统。汽轮机在特定的热力循环中的热力学特性是通过一系列热力学状态参数和指标表述的,如:压力、温度、焓、流量、功率、内效率、热耗率、煤耗等,详见表1-2。

表 1-2 汽轮机组热力性能指标的基本内容 (以凝汽式汽轮机为例)

序 号	热力性能分类	内 容	单 位
1	基本参数—压力指标	主蒸汽压力	MPa
2		再热蒸汽压力	MPa
3		各段抽汽 (包括调节级) 压力	MPa
4		管道压损 (包括抽汽管道压损)	%
5		阀门 (电动主汽门、自动主汽门、调门、中联门等) 压损	%
6		排汽压力 (真空)	kPa
7		排汽压损	%
8	基本参数—温度指标	主蒸汽温度	℃
9		再热蒸汽温度	℃
10		各段抽汽 (包括调节级) 温度	℃
11		排汽温度 (包括高、中、低压缸)	℃
12	基本参数—流量指标	主蒸汽流量	t/h
13		给水流量	t/h
14		凝结水流量	t/h
15		冷却水 (循环水) 流量	t/h
16		减温水 (过热器和再热器) 流量	t/h
17		各段抽汽流量	t/h
18		轴封、门杆泄漏量	t/h
19		外部泄漏流量	t/h
20		内部泄漏流量	t/h
21		不明泄漏量	t/h
22		系统贮水量变化	t/h
23	基本参数—功率指标	汽轮机 (包括各缸) 内功率	kW
24		发电机出力 (功率)	kW
25		辅机功率	kW

续表

序 号	热力性能分类	内 容	单 位
26	效率指标	高压缸、中压缸、低压缸缸效率	%
27		高压缸、中压缸、低压缸通流效率	%
28		各段级组焓降	kJ/kg
29		各段级组效率	%
30		汽轮机相对内效率	%
31		汽轮机绝对内效率	%
32		机电效率	%
33		相对电效率	%
34		绝对电效率	%
35	回热系统指标	给水温度	℃
36		热井水温	℃
37		各加热器（包括凝汽器）出力	kW
38		各加热器（包括凝汽器）端差	℃
39		各加热器（包括凝汽器）效率	%
40		各泵组效率	%
41		驱动给水泵汽轮机效率	%
42		给水管道路损失（阻力、散热等）	%
43		冷却水（循环水）温度	℃
44	能耗指标	机组（毛、净）热耗率	kJ/kWh
45		机组汽耗率	kg/kWh
46		厂用电率	%
47		机组发电煤耗	kg/kWh
48		机组供电煤耗	kg/kWh

汽轮机热力性能试验必须在规定的汽轮机运行工况下进行。由于热力学特性是通过一系列热力学状态参数和指标，如：压力、温度、焓、流量、功率、内效率、热耗率、煤耗等表述的，因此，热力性能试验要求规定一些特殊的试验工况条件，如：负荷、参数变化、系统隔离、试验持续时间、测量系统安装与运行等。试验目的和范围不同，这些工况要求也不尽相同。即使是对在线优化试验，也要求试验参数变化（包括负荷）控制在一定的范围内进行。有关试验工况要求将在第三章中详细分析。

热力性能试验是以工程热力学、工程流体力学、热工测量等工程科学及误差理论等为理论基础。因此，它的试验、测量、计算和分析的方法必须遵循热力学、流体力学、误差分析的基本原理。就是说，无论是试验的设计、测量系统的设计和布置、测量仪器仪表的选择和安装，还是试验结果的计算、修正和试验不确定度分析，都不能偏离这些学科的基本原理。

试验是人们认识事物本质和运动规律的一种基本方法，测试技术是其基础。热力性能