

普通高等教育实验实训规划教材

能源动力类

汽轮机实验技术

饶洪德 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育实验实训规划教材

能源动力类

汽轮机实验技术

主 编 饶洪德

编 写 王运民 卢猪祥
主 审 李 勇 金建国

晋风华 谭欣星
曹丽华

藏书章



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书分为七章，主要内容包括：汽轮机实验概述，汽轮机实验常用测量仪表及测量方法，汽轮机热力性能试验，汽轮机调节系统性能试验，汽轮机组振动实验，设计性、研究性、创新性实验，实验装置及应用软件。

为了适应汽轮机技术实验独立设课和不独立设课的不同要求，本教材的实验附有实验原理、实验设备和思考题。大多数学生通过自学实验原理内容后，可自行完成实验。本教材按 30~50 学时编写，近 30 个实验，其中综合性设计性实验 9 个。可根据教学条件和不同的教学基本要求进行选择。

本书可作为本科能源动力类专业的实训教材，也可供高职高专相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机实验技术/饶洪德主编. —北京：中国电力出版社，2010.1

普通高等教育实验实训规划教材. 能源动力类

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9692 - 7

I. ①汽… II. ①饶… III. ①火电厂—蒸汽透平—实验—高等学校—教材 IV. ①TM621.4—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 202045 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 377 千字

定价 27.00 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

前 言

为了适应拓宽专业面,推行素质教育的需要,我们于2005年开始着手编写一本适合能源动力类专业的实验教材,经过近一年的努力,于2006年8月完成了初稿,定名为“汽轮机实验技术”,作为讲义供热能动力工程专业的学生使用。2009年3月,根据使用情况又对初稿进行了重新编写。

知识、技能和能力的培养是密切相关的,学习者的能力要在学习知识和获取技能的过程中日积月累,逐渐形成与发展。从知识的掌握到能力的形成与发展不是直接的,而是以技能为中介。因此,对于汽轮机原理等具有工程特点和实践性很强的课程,加强工程训练,特别是实践技能的训练,对于培养工程技术人员的素质和能力具有十分重要的作用。

编写本书的指导思想是:

(1) 验证性的实验,重点放在基本技能训练上,故本教材以技能培养作为主线来组织教学。

(2) 为了突出基本技能的训练和培养学生分析及解决实际问题的能力,本教材力求做到目标明确、措施落实。

1) 会正确使用常规仪器是汽轮机实验的基本要求。掌握常用仪器测量的主要技术指标,重点培养学生熟练使用信号分析仪、示波器等,会用分析仪测量振动的相位、频率、平均值、有效值、峰值和显示X-Y函数关系,因此我们把学习仪器的使用测试方法贯彻于理论教学和各个实验中。

2) 所有实验设备都由学生自行安装、调试,并且相当一部分实验只提出实验内容和目的、要求,实验实施方案由学生自己拟定,以培养他们组织实验的能力。

3) 考虑到在实验过程中故障现象是很多的,因此在这方面没有专门安排实验内容。指导教师可针对实验中出现的典型故障,(或由学生)现场讲解故障现象及其消除方法,引导学生进行思考,以提高学生分析问题、解决问题的能力。

(3) 为了适应汽轮机技术实验独立设课和不独立设课的不同要求,本教材的实验附有实验原理、实验设备和思考题。大多数学生通过自学实验原理内容后,可自行完成实验。

(4) 本教材按总学时30~50学时编写,近30个实验,其中综合性设计性实验9个。可根据教学条件和不同的教学基本要求进行选择。

本书由谭欣星、饶洪德、王运民、晋风华、卢绪祥共同编写。其中,第一章由谭欣星编写;第三章第三节由王运民编写;第五章第一~三、五节由晋风华编写,第六~八节由卢绪祥编写,其余部分由饶洪德编写。第四章第四节由杨继民提供初稿;第六章第三节由卢绪祥提供初稿,全书由饶洪德统稿。

全书由东北电力大学李勇教授、金建国高级工程师、曹丽华副教授共同审读,对书稿提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中,还得到了长沙理工大学李录平教授的热心指导与

帮助，在此一并致以深切的谢意。

全书在编写过程中参考了相关的资料、产品样本和说明书，在此向有关人员表示真诚的感谢。

本书涉及的知识面较广，由于水平有限，疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 1 月

目 录

前言

第一章 汽轮机实验概述	1
第二章 汽轮机实验常用测量仪表及测量方法	7
第一节 概述	7
第二节 温度测量	16
第三节 压力测量	23
第四节 流量测量	33
第五节 转速测量与功率测量	39
第六节 双通道 FFT 信号分析仪	46
第七节 声发射检测装置	54
第八节 数字存储示波器	67
第九节 激光多普勒振动分析仪	74
第三章 汽轮机热力性能试验	78
第一节 概述	78
第二节 汽轮机组热力性能测定	80
第三节 汽轮机热力实验项目	87
第四节 凝汽器特性实验	95
第四章 汽轮机调节系统性能试验	100
第一节 调节系统静态特性及其测定试验	100
第二节 汽轮机调节系统动态试验	108
第三节 阀门试验	112
第四节 超速保险试验	116
第五节 危急保安器实验	123
第五章 汽轮机组振动实验	126
第一节 机械振动的基础知识	126
第二节 振动参量的基本测量方法	137
第三节 振动信号的测量与常用测振传感器	139
第四节 振动特征信号的分析	147
第五节 汽轮机组振动性能现场试验	153
第六节 转子动平衡实验	158
第七节 叶片振动实验	166
第八节 叶轮振动实验	177
第六章 设计性、研究性、创新性实验	180
第一节 概述	180

第二节	设计性、研究性、创新性实验.....	185
第三节	汽轮机组振动故障模拟实验.....	200
第七章	实验装置及应用软件.....	209
第一节	300MW 汽轮发电机组模拟转子实验台	209
第二节	激振装置.....	215
第三节	ADRE 旋转机械数据采集软件	220
第四节	声发射采集软件 AEwin	226
第五节	ALGOR 有限元分析软件	234
参考文献		240

第一章 汽轮机实验概述

一、汽轮机实验技术课程的主要目的和任务

《汽轮机实验技术》课程是热能动力工程专业的专业课之一。通过该课程的学习,使学生从理论上掌握汽轮机方面的专业知识,并通过实验加深对所学知识的理解,为学生毕业后从事汽轮机运行、检修、调试、管理及设计等方面的技术工作打下良好的基础。

《汽轮机实验技术》课程的主要目的和任务:

(1) 通过对多层次实验现象的观察、分析、研究和对物理量的测量,使学生进一步掌握汽轮机原理及其实验的基本知识、基本方法和基本技能;巩固、拓展、加深对汽轮机原理的理解,并提高应用水平。

(2) 培养和提高学生从事科学实验的能力,包括进行综合实验、应用实验和设计实验的能力,以及自主学习和科学研究的能力,提高自主创新意识和素质。

通过汽轮机实验课程的训练,学习、掌握汽轮机实验的主要过程和方法(如阅读实验教材,查阅参考资料,正确理解理论与实验内容,学习正确使用仪器设备,实际测量物理量,观察分析实验现象,正确记录、处理实验数据,分析讨论实验结果,撰写合格的实验报告、设计报告等);独立自主完成适当的基础性、提高性、综合性、应用性、设计性、创新性实验任务及小课题;培养、提高独立解决实际问题的能力,为从事汽轮机运行、检修、调试、管理及设计等方面的技术工作打下坚实的基础。

(3) 培养和提高学生从事科学实验的素质,包括理论联系实际、实事求是的科学作风,严肃认真、一丝不苟的工作态度,勤奋努力、刻苦钻研、主动进取、积极创新的探索精神,遵守纪律、严格执行科学实验操作规程、爱护公共财物的优良品德,相互协作、共同探索的团队合作精神。

二、汽轮机实验的作用和地位

众所周知,科学技术的发展离不开实验,实验是促进科学技术发展的重要手段。我国著名科学家张文裕在为《著名物理学实验及其在物理学发展中的作用》一书所写的序言中,精辟论述了科学实验的重要地位。他说:“科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,也是工程技术的基础。”又说:“基础研究、应用研究、开发研究和生产四个方面如果结合得好,经济建设和国防建设势必会兴旺发达。要把上述四个环节紧密贯穿在一起,必须有一条红线,这条红线就是科学实验。”

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。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,而理论研究和实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。

首先,通过汽轮机实验获取汽轮机组的性能数据,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确度水平的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性能指标。

其次,汽轮机实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作用。如汽轮机性能验收试验(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)的性能进行全面的评价和鉴定。

汽轮机实验对运行中的汽轮机组的节能降耗工作至关重要。在不停机、不揭缸的情况下,通过汽轮机组的在线试验研究,获得能真实反映汽轮机组运行状态和性能的数据,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。

汽轮机实验还是开展机组状态评估和寿命管理的重要技术手段。通过汽轮机性能试验获得汽轮机组的综合性能指标,可以对机组热力性能的劣化程度进行评估,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,汽轮机实验对准确掌握汽轮机特性,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。

汽轮机课程是一门理论性和实践性都非常强的课程,其理论部分比较难理解,主要原因在于学生没有工程背景,对汽轮机的结构、工作原理、性能特性不熟悉。通过相关的实验操作,可使学生获得感性认识,有助于对所学知识的理解。另外,通过汽轮机实验,还可培养学生的动手能力,尽快适应现场工程的实际需要,初步具备工程师所具有的分析问题、解决问题的实践技能。

三、汽轮机实验教学体系和基本要求

1. 汽轮机实验教学体系

在本课程教学中,紧紧把握信息时代汽轮机实验教学的建设与发展规律,坚持“创新发展”的改革思路,大胆进行教学改革与创新;树立“以学生为本,知识传授、能力培养、素质提高协调发展”的教育理念和以自主学习、研究及创新能力培养为核心的实验教学观念,改变实验教学依附于理论教学的传统观念,建立有利于培养学生实践能力和创新能力的实验教学体系。

按照经济建设和社会发展对高素质创新性人才培养的需求,将实验教学与理论教学紧密结合起来,注重实验项目的先进性和开放性,将科研成果转化为实验教学内容,加强专业知识应用到工程实际问题的能力培养,以及主要专业设备与装置安装和操作运行知识获取的能力培养,形成体现能源动力工程学科特点及自身系统性、科学性和完整性的课程体系,全面培养学生的科学作风、实验技能以及综合分析、发现和解决问题的能力,使学生具有创新、创业精神和实践能力。

实验教学遵循基础性、综合性、研究性、开放性的基本原则,根据学生的认识规律和实

际水平,科学地设置实验项目,注意加强热科学实验能力的培养,充分利用网络、计算机辅助实验教学软件 and 多媒体实验教学课件,促进虚拟、仿真实验与实际实验的结合。以培养学生的实践能力、创新能力和提高教学质量为宗旨,以实验教学改革为核心,以实验资源开放共享为基础,充分调动学生学习的主动性,实现学生自主学习的实验教学模式。

为强化自主学习实践、注重探索研究、创新能力训练,根据“多层次、模块化、组合式,且相互衔接”的原则,构建科学的汽轮机实验教学内容新体系,实现以学生自我学习为主的教学模式。实验教学内容由浅入深,由简单到综合,分为基本型实验、综合设计型实验、研究创新型实验,并在贯穿于各个层次的实验教学中始终坚持“开放性、设计性”,以充分调动学生学习的主动性。

进行一定时间范围内的“开放式”选课与教学,体现以学生为本、开放教学的教育思想,有效地扩大实验教学的信息量,拓展学生的视野和知识面;同时,留给学生充分的想象空间,为学生搭建一个亲自动手进行自主学习、自主实验、创新训练的平台。

2. 汽轮机实验教学的基本要求

(1) 比较系统地分层次学习汽轮机热力性能、汽轮机调节系统、汽轮机振动等方面的实验,并进行综合性、应用性和设计性方面的实验训练。

(2) 学习、掌握常用汽轮机实验仪器的原理、性能、选型和使用方法。

(3) 学习、掌握一般汽轮机实验的方法、实验技术及常规性能参数的测量方法。

(4) 学习、掌握实验数据及误差的处理方法(不确定度评定方法),能够正确表述结果,并进行结果分析和讨论。

(5) 通过实验学会观察、分析、研究汽轮机的热力性能和机械性能,加深对某些故障现象和运行规律的认识和理解。

(6) 养成良好的实验习惯和严谨的科学作风,特别是严肃认真地对待实验数据,杜绝弄虚作假,树立实事求是的科学态度和道德观念,并能根据实验要求写出规范的实验报告。

本课程培养学生进行科学实验工作的综合能力,包括实际动手能力、分析判断能力、独立思考能力、革新创造能力、归纳总结能力、口头表达能力等。

四、汽轮机实验的主要内容

汽轮机的实验涉及很多方面,基于实验条件本课程主要是针对汽轮机的热力实验、调节系统性能实验和振动实验。

汽轮机热力实验可以测试级的轮周效率和级效率、单缸汽轮机效率、多缸汽轮机效率和凝汽器特性。

调节系统性能实验可以进行超速实验(了解危急保安器的动作范围);主汽门严密性实验、调节系统静态特性实验(测试速度变动率和迟缓率)和动态特性实验。

汽轮机振动实验包括汽轮机组振动性能实验(如汽轮机升速与降速实验)、振动与滑动轴承油膜参数关系;转子动平衡实验;叶片振动实验(叶片频率测试)。

五、汽轮机实验的一般方法

在汽轮机实验教学过程中,不少学生只重视实验结果,不重视分析结果;只满足于实验的成功,而不愿对实验失败的原因进行分析。造成这种现象的原因,除了是学生对实验的根本目的缺乏深刻的认识以外,不懂得如何分析实验、没有掌握实验分析的一般方法也是非常重要的因素。

汽轮机原理是一门实验性较强的专业课,实验内容很多,在实验过程中会有多种因素影响、干扰实验结果,致使实验失败。此时,实验分析显得尤其重要:一方面,可以找出并排除影响因素,使实验重做才能获得成功;另一方面,还可以总结出经验教训,甚至可能还有意外的收获及新的发现,这在科学史上是不乏其例的。因此,尽管汽轮机原理教学没有明确实验分析这一目的,但除了使学生达到提高动手能力、了解实验原理和方法、验证所学知识这些目的以外,让学生辩证地看待实验的成功与失败、教给学生进行实验分析的一般方法、初步培养学生实验分析的能力还是必要的。

实验过程中,要注重培养学生实验的动手能力和分析能力,要达到这个目的,实验方法很重要。汽轮机实验方法分为以下四个方面。

1. 实验预习

实验预习是进行汽轮机实验的首要步骤,不预习不得进行实验。实验开始前要仔细阅读实验教材,明确实验目的,了解实验的内容、步骤、测量方法和注意事项等。弄清楚该汽轮机实验要完成的任务、感知的现象、理解的规律,加深对理论的认识。如调节系统静态特性实验,在实验过程中要理解速度变动率对汽轮机转速、负荷的影响;静态特性曲线获得的方法;它的形状对汽轮机运行的作用等。另外,学生对自己感兴趣的现象、规律或想探索的事物,在实验前都有一定的目的性。

用专用实验报告纸(册)写出合格的实验预习报告,具体内容有:①实验名称、日期,简述实验目的、仪器(名称、规格和编号可在进入实验室后填写),明确阐述主要原理、公式(包括各物理量意义),画好线路图,简述实验内容,简写关键步骤、注意事项等;②设计并画好原始数据表格(要求单独用一张实验报告纸);③实验指导教师采用全查、抽查、提问、讨论等方式,检查预习情况,记录预习成绩。

2. 实验装备的熟悉

了解了汽轮机实验的内容和目的后,就要熟悉实验设备、实验平台和系统。只有这样,才能在作实验时不至于茫然、无从下手。对实验系统的功能、设备的特性,电源、水源、气(汽)源等有一个全面的了解;对于各种测量仪器、仪表的使用,在实验前都要做到心中有数。实验系统或设备不完全与实际设备相同,有些是物理模型,有的则是数学模型(如仿真系统),要充分认识它们与实际的设备及系统的区别。另外,实验过程的注意事项要清楚,如人身安全和设备安全。

3. 实验操作

实验操作是进行汽轮机实验的最重要步骤,主要包括阅读资料、调整仪器、观察现象、获取数据、仪器还原等。实验操作过程应在实验指导教师的指导下进行,在不损坏实验设备的情况下,学生也可自己大胆地进行实验操作。

进入实验室后,按照实验室规定要求,按学号和仪器号“对号入座”,填写有关“仪器使用及维护情况记录”等。然后,根据安排对照实验设备实物,进一步熟悉实验内容,掌握实验仪器构造、原理及其使用方法;在实验室规定的条件下对实验仪器设备进行线路连接、安装,将仪器调试到正常使用状态,经教师检查,确认无误后,按照实验的要求、原理、内容及步骤,逐步、逐项进行实验操作,观察实验现象,测量实验数据。

测量、记录数据的原则是:先定性,后定量,先试测,再进行正式测量。同时,将实验数据记录在事先准备好的原始数据表格中。

实验过程中,随时记录的实验测量数据称为原始数据。记录原始数据时,应注意有效数字的位数,并与数据表格中物理量的单位相对应。原始数据不得涂改,如确系记错,可在数据上画一横线,并在其上边或下边写上更改数据。预习报告中所列其他数据,如测量日期、仪器编号、型号、量程、分度值、准确度等级等,可在定量测量之前首先一一记录好。

4. 实验数据整理与分析

实验过程或实验结束后会得到很多图像和数据,通过对图像和数据的处理和分析,可以发现汽轮机设备运行过程的特性、现象和静态规律,按实验报告的要求撰写实验报告,从而分析评价该实验是否达到了实验的目的。

正确处理实验数据,并写出完整的实验报告,是汽轮机实验基本训练的重要内容之一,它是在整理实验数据的基础上,对所作实验进行全面分析与总结得出的最终成果。因而实验报告不等同于预习报告,凡预习报告中已正确写好的实验目的与要求、仪器、原理、图、步骤等,在实验报告中不必再重写,但可加以补充。数据处理时必须先重新整理原始记录,然后进行计算作图(包含主要计算处理的过程),最后附上原始记录。

实验报告的主要内容:①实验名称、日期、学号、班级、姓名;②实验目的与要求;③主要仪器的名称、规格、编号;④基本原理和主要公式(实验原理的叙述和公式推导等);⑤实验主要内容及简要步骤;⑥数据表格、数据处理、结果表示;⑦对结果进行正确的分析、讨论。

原始数据一般要按列表法重新整理,并整齐地抄录在正式实验报告的表格中。根据误差理论和不确定度的表示方法,认真进行数据的处理,得出正确表述的实验结果。需要作图时,要求用作图纸,按作图法正确作图处理实验数据。

通过对结果进行分析、讨论(包括回答思考题、完成习题等),可以发现在测量与数据处理中出现的问題,对实验中的现象进行解释,对实验的装置和方法提出改进意见等。这对于培养与提高学生科学实验的能力是十分有益的。

实验报告要字迹端正、叙述简练、数据齐全、处理正确、表格规范。数据处理是极易出现错误且不易掌握的内容,应在掌握基本实验理论的基础上,通过多次实验数据的实践和训练,不断改正错误,逐步掌握正确处理数据的方法。

对于设计性、研究性、创新性实验,其预习报告(应提前1~2周提交)、实验操作、正式报告参见第六章设计性、研究性、创新性实验。

六、实验室的主要规则

要学好汽轮机实验,还要严格执行学校制订的有关实验室及仪器设备管理、使用的各项规章制度。具体要求如下:

(1) 坚持预习。课前必须充分作好实验预习,写好预习报告,真正了解本次实验“做什么?怎样做?为何这样做?”否则,不得进行实验,直到预习合格后,方可进行实验。不允许在实验操作中为凑数而任意涂改数据或抄袭别人的数据与报告等。

(2) 严肃实验课堂纪律。不得无故缺席、迟到、早退,若迟到15min以上,不能进实验室进行该项实验。

(3) 坚持实验“对号入座”,并签字。进入实验室后,按照实验室规定要求,按学号和仪器号“对号入座”,填写有关“仪器使用及维护情况记录”等,并签字。

注意:在实验操作前,仔细检查是否有损坏的仪器设备,并及时报告,以免分不清责

任；进行“分组实验”时，未经允许不要随意串组或搬用其他组的仪器设备。

(4) 坚持检查了解、爱护仪器。实验操作前，要检查了解仪器的构造、性能、使用方法，操作时要严肃认真，自觉爱护仪器设备，未经许可不能擅自挪动或调动他组仪器。

(5) 坚持安全第一。实验过程中，务必注意安全第一，严格遵守操作规则和注意事项，特别是对汽轮机热力性能类、旋转机械振动类等高危实验，务必经过老师检查后，方可接通电源，进行实验，严格避免发生人身或设备事故。

(6) 坚持损坏赔偿报告。仪器设备发生故障时，应立即停止使用或断开电源，并立即报告指导教师；仪器设备损坏时，要及时报告指导教师，并填写“仪器损坏报告”单，事后根据学校规定照价赔偿。

(7) 坚持数据确认、仪器使用签字。实验数据测量完毕后，必须请任课教师审阅，实验数据、预习报告、仪器使用及维护情况记录必须由教师签字确认后，方才有效。

(8) 坚持善后、值日制度。实验结束后，每位同学务必将桌、椅、仪器等整理复原，关好门窗、水电，经老师许可后，方可离开教室。每次实验课，各实验班组均由班长、课代表负责，安排两名值日生，配合实验室教师监督、完成该实验室的仪器复原、环境卫生等工作（室内不允许留垃圾）。

(9) 及时提交实验报告。按时完成实验报告，连同实验原始数据，在下次上课前，由课代表负责收齐，课前交给任课教师，以便教师及时批改、发还实验报告，并记录成绩。

第二章 汽轮机实验常用测量仪表及测量方法

第一节 概 述

一、测量的基本概念

测量是人类对自然界中客观事物取得数量概念的一种认识过程。它用特定的工具和方法,通过试验手段将被测物理量与另一同名的、作为单位的物理量进行比较,以确定两者之间的比值。因此,测量实际上是确定一个未知物理量数值的过程。

(一) 被测量和仪表的测量过程

通常把需要检测的物理量称为被测量或被测参数。在汽轮机试验的测试中常见的被测参数有压力、温度、气流速度、流量、液位、转速、功率、振动幅值及频率等。若所测的物理量在整个测量过程中,其数值始终保持不变,即不随时间变化,则这种量称为静态量(或稳态参数),如稳定状态下流体的压力、温度和速度。若所测量的物理量在测量过程中随时间不断改变其数值,则这种量称为动态量(或动态参数),如汽轮机启动过程中的转速、功率;非稳定工况下流体的压力、温度和速度等。

要确定被测量的大小,就需要用相应的测量仪表来进行检测。仪表的测量过程就是把被测量的信号以能量形式进行一次或多次转换和传递,并与相应的测量单位进行比较的过程。如弹簧管压力计测量压力的过程是被测压力作用在弹簧管上使其发生角变形,再通过杠杆传动机构的传递和放大以及齿轮机构的传动,将角变形变成压力表指针的偏转,最后与压力刻度标尺上的测压单位进行比较而显示出被测压力的数值;热电偶测量温度时,是利用热电偶的热电效应,把被测温度转换成热电势信号,然后再把热电势信号转换成毫伏表上的指针偏转,并与温度标尺比较而显示出被测温度的数值。

(二) 测量方法

由于被测量的性质及其测量目的和要求的不同,所使用的测量方法和仪器也不完全相同。按照获得测量结果的方式不同,测量方法分为直接测量、间接测量和组合测量三类。

1. 直接测量

被测量的数值可以直接从测量仪器上读得的测量称为直接测量,如压力计测量压力、温度计测量温度等。直接测量是测量的基础。直接测量又可以分为直读法和比较法两种。

(1) 直读法。被测参数可直接从仪表上读出,如用刻度尺测量长度,用弹簧秤测定质量,用水银温度计测温度,用压力表测压力等。这种方法的优点是使用方便,但一般精度较差。

(2) 比较法。这种测量方法一般不能从测量仪表上直接读得测量结果,往往要使用标准量具,因此测量手续麻烦,但测量仪表本身的误差往往能在测量中抵消,故测量精度较高。比较法又分为零值法、差值法、代替法三种。

1) 零值法。测量时,使被测量对仪表的作用与同类已知量的作用相抵消,总效应为零,

则被测量就等于已知量。例如，用天平秤测定物质的质量，用电位差计来测量热电偶在测量温度时产生热电势的大小。

2) 差值法。从仪表上直接读出两个量之差作为所求之量。如用 U 形液柱式差压计测量介质的压差等。又如，用热电偶和毫伏计测量温度 t 时，从毫伏计上得到的电动势应是被测温度 t 与冷端温度 t_0 之差所产生的热电势，然后根据冷端温度 t_0 ，在相关表上查出一个热电势，二者相加而得到所要求的热电势，再根据它求得被测温度。

3) 代替法。在被测量无法直接测量时，选择一个可测的能产生相同效应的已知量代替，这种方法称为代替法。即调整已知量，使两者对仪表的影响相等，此时被测量即等于已知量，例如，光学高温计测量钢水的温度。

测量方法的选择应取决于测试工作的具体条件和要求。在满足测量精度的前提下，应力求简便、迅速，不苛求使用高精度的仪表。

2. 间接测量

由若干基本物理量组成的一个新物理量常常不能用直接测量法测出，如汽轮机的轴功率、管道中介质的流量、运行机组的效率等，这就需要采用间接测量法进行测量。

所谓间接测量，就是在所求量与若干相关变量的关系中，先对各相关变量进行直接测量，然后将所得数值代入某一关系式进行计算，从而确定所求量的数值。在间接测量中，凡属未知量 y 可以表示成被测量的数值，但不能直接从测量仪器上读得，而需要通过直接测得与被测量有一定函数关系的量，然后经过运算得到被测量的数值，均称为间接测量。如汽轮机功率，可借助式 (2-1) 求得，即

$$P = \frac{2\pi Mn}{60 \times 10^3} \quad (\text{kW}) \quad (2-1)$$

式中 M ——汽轮机主轴转矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

n ——转速， r/min 。

因此，要先分别对转矩 M 和转速 n 进行直接测量，然后将它们代入式 (2-1) 中，计算出轴功率 P 的数值。 M 及 n 分别采用转矩仪和转速仪直接测量。

3. 组合测量

测量中使各个未知量以不同组合形式出现（或改变测量条件以获得不同的组合），根据直接测量或间接测量所得数据，通过求解方程组来获得未知量的数值，此类测量称为组合测量。在组合测量中，未知量与被测量之间存在一定的函数关系。例如，用铂电阻温度计测量介质温度时，电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2) \quad (2-2)$$

式中 R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时的铂电阻值， Ω ；

R_0 —— 0°C 时的铂电阻值， Ω ；

a 、 b ——铂电阻的温度系数， $\Omega/^\circ\text{C}$ 。

为确定铂电阻的温度系数，首先需测得在不同温度下的电阻值，然后再经组合解联立方程组，以获得 a 、 b 的数值。

(三) 动态参数的测量

随时间不断改变数值的被测量称为动态参数（或称非稳态和瞬变参数），如非稳定工况或过渡工况时汽轮机的转速、功率等。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数、随机函

数等。

动态参数需要用显示式记录方式观察和记录被测量的变化过程和大小。对变化缓慢的参数,可用慢扫描示波器、X-Y 函数记录仪或其他机械式记录仪来测量变化图形。对快速瞬变的参数,则需采用灵敏度更高的记录或显示仪器,如电测、光测的方法记录和显示。

(四) 模拟测量与数字测量系统

有时,被测参数的量或变化不能表现为“可数”的形式,故在测量过程中需先将被测物理量转换成模拟信号,并以仪表指针的位置或记录仪描绘的图形显示测量的结果,此类测量称为模拟测量,其相应的测量系统称为模拟测量系统。模拟测量系统的优点主要是直观性强、灵活、简便、价格低;缺点主要是测量精度低,指示器读数误差难以达到 $\pm 0.5\%$ 的要求。

随着计算机和电子技术的发展,数字测量系统在汽轮机试验测试技术中的应用日趋广泛。这类测量可直接用数字形式表示。由于模/数(A/D)转换技术已能足够精确地将模拟信号转换成数字信号,所以模拟与数字测量两者间的转换已不存在技术上的困难,且数字测量系统的优点是能消除人为的读数误差,它可直接由数字记录或打印机记录数据,或与计算机相连,实现数据的自动处理。但由模拟信号表示的模拟量和由数字信号表示的数字量仍有本质上的区别。模拟信号含有“仿真”的意思,如模拟电压和电流信号的电平可以连续的或以无限小的阶跃量仿照被测量的变化而改变,理论上模拟信号的分辨能力是无限的。而在数字信号中,电压或电流的电平不再代表信号幅值的大小。这里只有两种电平,即“通”(或逻辑“1”)和“断”(或逻辑“0”),信号的幅度是用几个“通”或“断”电平的组合表示。所以,数字信号只能取有限个数值,按照断续阶跃量的形式来表达连续的时变信号,其分辨能力决定于所取增量的大小。因此,模拟测量系统的测量过程是连续的,它能给出被测变量的瞬时值;数字测量系统的测量过程则是断续的,它给出的数值是被测量在一段时间内的平均值。

二、测量仪器的组成与分类

(一) 测量仪器的组成

以图 2-1 所示的热电偶测定温度的简图来说明模拟测量系统的组成。由工作原理可知,热电偶以热电动势的形式来感知温度,构成测量仪器的感受件,通常称为传感器。热电动势通过补偿导线传递给电压计,即补偿导线起到传递信号的作用,构成测量仪器中的中间件或传递件。如果信号过弱,则还需放大。电压计接收到热电动势后,由电压计指针的偏转位置或数字指示出热电动势的大小,构成测量仪器的指示和记录件,称为效用件。因此,按工作原理,任何测量仪器都包括感受件、中间件和效用件三个部分。

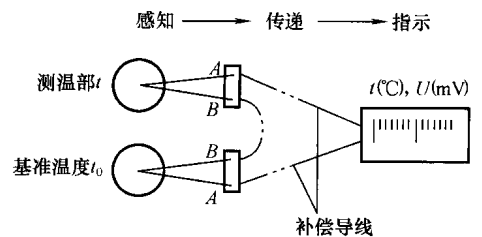


图 2-1 测量仪器组成示意图

1. 感受件或传感器

感受元件直接与被测对象发生联系(但不一定直接接触),其作用是感知被测参数的变化,同时对外界发出一个相应的信号。作为仪器的感受件,应当满足下述三个条件:

(1) 必须随被测参数的变化而发生相应的内部变化(这个内部变化就是传感器的输出信

号)。如热电偶的一端受热后,因金属的热电效应而产生热电动势。

(2) 只能随被测参数的变化而发出信号,不受其他任何参数的影响。如被测量是压力,感受元件只能在压力变化时发出信号,其他量变化时就不应发出同样的信号。

(3) 感受件发出的信号与被测参数之间必须是单值的函数关系,即一个确定的信号只能与参数的一个值相对应。

实际上,这三个条件难以完全得到满足,尤其是第(2)项。实际测量过程中,感受件不仅随被测量的变化而产生内部变化,而且当其他非被测量变化时,也会引起感受件的内部变化,故必须限制这类无用信号的量级,使它远远小于有用信号。如用金属热电阻测温时,要忽略压力变化对电阻的影响,可用理论计算的方法(如引入修正系数)或试验手段(如在线路上加补偿装置)来消除附加因素的影响。因此,任何一个具体的感受件(传感器)都会受到使用条件的限制,在使用上必须加以注意,否则就会得出错误的测量结果。

2. 中间件或传递件

中间件或传递件的作用是将感受元件发出的信号,经过加工或转换传递给显示元件。最简单的中间件是单纯起“传递”作用的元件,它将传感器的输出信号原封不动地传给效用件。这种单纯的传递件一般只有在传感器输出的信号较强、感受件与效用件之间的距离不大或效用件的灵敏度很高(或消耗的能量很小)时才有可能采用。常用的中间件有导线、导管、光导纤维、无线电通信等。

在近代的汽轮机试验测试工作中,要求实现数据集中观测、遥测和自动记录,所以大多数测量仪器的中间件还必须完成“放大”、“变换”和“运算”任务。感受件输出的信号经上述处理后,转换成显示部分易于接收的信号。

仪器的放大分为两类:一类是感受件发出的信号较强,放大时不需外加能量,它只利用机械构件(杠杆、齿轮等)扩大指针和标尺之间的相对位移,使之易于观测。如弹簧管压力表测压时,压力信号使弹簧管发生角变形,此变形量很小,需由拉杆和齿轮机构加以放大。另一类是感受件发出的信号较弱,放大时需要外加能量,这在电测仪器中用得较多。如用电子电位计测量热电动势时,就要将电动势放大10万倍,才足以驱动伺服电动机带动指针作出指示。这类放大在电测仪器中是利用电子器件来完成的。

有时,为了信号放大或改变传感器输出信号性质的需要,在电测仪器的测量电路中设有信号“变换器”和“运算器”。如感受件输出的一般为模拟信号,可以直接送到显示部分,也可以通过A/D转换成数字量传输到计算机进行信息处理。

3. 效用件或显示元件

显示元件直接与观测人员发生联系,其作用是根据传递元件传来的信号,向观测人员显示出被测量在数量上的大小和变化。根据显示方式的不同,可分为指示式、记录式和数字式三种。指示式仪表是以指针、液面和标尺的相对位置来显示被测量的瞬时数值,例如,弹簧式压力计是以指针偏转角度来显示压力大小的,U形管是以液面高低来显示压力大小的,大气压力计是以标尺的位置来显示大气压力的。指示式仪表只能指出被测量当时的瞬时值,如要知道被测量随时间变化的情况,就需要用记录式仪表。记录式仪表可以将测量值记录在随时间变化而连续移动的纸上,如X-Y记录仪、磁带记录仪及电子电位差计等。数字显示式仪表是将模拟量通过模数编码转换器转换成二进制数字量,再由译码器将二进制数字量译成十进制数字量,并通过数码管直接向观测人员显示被测量数值和单位的仪表。数字频