

水力机组现场测试手册

刘晓亭 李维藩 主编

水利电力出版社

水 力 机 组 现 场 测 试 手 册

刘晓亭 李维藩 主编

水 利 电 力 出 版 社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本《手册》由总论和六篇组成,主要内容有原型机组的效率特性,机组的稳定性,调速系统及过渡过程,机组设备的力特性,机组的轴承性能及过流部件的气蚀磨损和裂纹等试验。本《手册》重点介绍水电厂水力机组现场试验的目的和作用,测试原理和方法,仪器配置和调试,试验工况和程序,以及资料整理与成果分析。此外,还较详细地叙述了现场测试项目的精度要求和误差范围。

本《手册》内容丰富,技术先进,准确可靠,实用性强。可供从事水电厂水力机组试验、运行、安装、检修人员使用,也可作为大专院校水动、水机及水电站自动化等专业的参考书。

水力机组现场测试手册

刘晓亭 李维藩 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京小红门印刷厂

*

787×1092毫米 16开本 42.5印张 964千字 2插页

1993年9月第一版 1993年9月北京第一次印刷

印数 0001—3960册

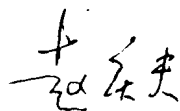
ISBN 7-120-01844-2/TV·670

定价 17.15元

序

我国水电建设发展迅速：截至1992年底，全国电力总装机容量已达16443.31万kW，其中水电容量4019.35万kW，占24.4%。为了适应水电建设发展，加强水电厂运行管理，提高检修、试验水平，原水电部生产司于1984年组织湖北、西南、福建、甘肃、广东和华北等电力试验研究所，编写《水力机组现场测试手册》。参加编著本书的人员，都是长期从事水电厂水力机组测试工作，具有较深理论造诣和丰富实践经验的高级工程师。他们在总结现场试验经验、吸收国内外先进测试技术的基础上，以科学的态度，实事求是的精神，克服种种困难，于1987年内部刊印成册。经过3年多试用，1991年前后又作了许多的补充修改，终于形成了目前这个版本。该版本现将正式出版与读者见面，相信对从事水电厂运行管理，水力机组试验，以及教学科研人员会有所帮助。并愿意将此书献给正在始建的三峡工程，以及一大批已建和正在建设的大中型水电厂，作为他们热爱水电事业，促进三峡工程迅速建设的心愿。

《水力机组现场测试手册》是一部具有实用性、科学性、先进性的现场试验工具书，是我国第一部直接为现场测试人员服务的手册，完善了测试项目及测试原理、方法，为进一步开展水力机组测试工作打下了基础，其技术经济效益是明显的，深信会受到广大读者的欢迎。



前 言

为适应我国水电建设事业的发展,满足水电厂的运行检修的需要,提高水力机组现场试验研究工作水平,促进水电厂及电网的安全经济运行,推动科技进步,原水利电力部生产司1984年组织湖北、西南、福建、甘肃、广东和华北等电力试验研究所,在总结现场试验经验并吸收新的测试技术的基础上编著了《水力机组现场测试手册》,并于1987年内部印行试用。经过3年来的现场应用,获得了水力机组测试人员和广大读者的好评。为了进一步发挥本《手册》的作用,在原水利电力部生产司李维藩同志和能源部电力司杨金栋同志支持和组织下,经补充修改,现由水利电力出版社正式出版。

本《手册》主要特点,突出现场实用为主,以内容准确为原则,在总结现场试验经验的基础上,力求广泛吸收或移植国际先进测试技术。为使本《手册》使用方便、结构合理,各章内容的编写层次皆按测试原理和方法、资料整理和成果分析等顺序进行。本《手册》是我国有史以来第一部直接为水电站水力机组现场测试人员服务的实用工具书。

由于本《手册》力求实用,内容简明扼要,因此,对于试验中所应用的传感器元件、仪器仪表、装置设备的结构原理、名词定义、物理概念等未作详细介绍和说明,计算公式也未作推导。

本《手册》主要编著人:总论由湖北电力试验研究所刘晓亭编著;第一篇中第一章、第二章、第三章中第五节及第四章由福建电力试验研究所陈仁编著,第三章中第一节及第五章由湖北电力试验研究所金建范编著,第三章第二节及第六章由西南电力试验研究所欧学修编著,第三章第三节、第四节、第六节由湖北电力试验研究所刘德钰编著;第二篇由西南电力试验研究所江树勋编著;第三篇由湖北电力试验研究所喻少山、华北电力试验研究所刘丽栗编著;第四篇由西南电力试验研究所黄益生、湖北电力试验研究所刘晓亭编著;第五篇由湖北电力试验研究所刘晓亭、西南电力试验研究所黄益生编著;第六篇由甘肃电力试验研究所顾四行、广东电力试验研究所郭芸编著。顾四行参加了本书的校核。全书由刘晓亭、李维藩主编。

在本《手册》编著出版过程中,得到湖北、甘肃电力试验研究所,四川电力科学试验研究所和全国水机磨蚀试验研究中心支持和资助,在此深表谢意;本《手册》在编著过程中,还曾得到华中电管局林焕森同志、湖北电力局王春暖同志、能源部电力司余卫国同志以及水利电力部地勘机电研究所、水利水电科学研究院机电研究所、水利电力部天津勘测设计院科研所的关心和帮助,在此一并表示感谢。

由于编著人员的经验和水平有限,现场试验有些尚不够充分,本《手册》中缺点和错误在所难免,望读者提出宝贵意见。

编 者

1992年10月

目 录

序	
前言	
总论	1
一、水力机组现场试验的目的和意义	1
二、现场试验的内容和分类	1
三、现场试验的主要测试参数和测试方法	3
四、现场测试技术的发展	5
五、水力机组现场测试误差分析与数据处理的原则	9
 第一篇 水轮机效率试验	
第一章 概论	18
§1-1-1 原型水轮机效率试验的意义与目的	18
一、原型效率试验的意义	18
二、原型效率试验的目的	19
§1-1-2 试验原理概述	20
一、水轮机效率的测取与计算	20
二、测试内容	20
§1-1-3 试验方法的种类与选用	21
§1-1-4 通用试验条件	23
§1-1-5 试验的前期工作	24
一、技术资料的准备	24
二、察看试验现场,选取试验方法	24
三、草拟试验大纲及技术准备工作	24
四、试验工作的落实及检查	25
§1-1-6 试验的现场工作	25
一、试验现场的组织工作	25
二、测点的设置与专用装置的安装	27
三、测量时间和次数	29
四、开机前的工作	29
五、现场测试程序	29
六、试验后的现场工作	30

§1-1-7 试验资料整理与试验报告编写	30
一、试验资料的整理工作	30
二、试验成果	31
三、试验报告的编写工作	31
四、试验报告的审核	38
五、试验成果产生争议时的处理程序	38
第二章 水头与功率的测量	39
§1-2-1 水头测量	39
一、三种水头的定义	39
二、三个水头之间的关系	41
三、水头的计算基础	42
四、水头的测量方法	42
五、水轮机工作水头的测量参数	43
§1-2-2 上下游水位的测量	44
一、水位测量的基本要求	44
二、测量仪器——水位计	45
三、水位测量	48
§1-2-3 管道的水压测量	49
一、压力测量的特点	49
二、静压测量的要求	49
三、静压测量的仪表	51
四、施测要求	51
§1-2-4 水头测量的误差分析	51
一、水头实测值的差异与换算	51
二、误差分析	52
§1-2-5 发电机有功功率的测量	52
一、测量条件	52
二、测量方法	53
三、施测要求	56
§1-2-6 有功功率测量误差分析	56
第三章 流量测量	58
§1-3-1 流速仪法	58
一、流量测量的原理和特点	58
二、流量测量的原则和要求	59
三、测流断面选择	62

四、测点数目的确定和布置	66	§1-4-4 误差分析	168
五、流速仪支架的设计和安装	71	一、测量误差	168
六、排挤效应(堵塞修正)	81	二、计算误差	168
七、流速分布图的绘制和流量计算	83	§1-4-5 用相对法求取最优	
八、流量测量的误差分析	93	协联关系	169
§1-3-2 压力—时间法(水锤法)	96	一、原理	169
一、测流原理	96	二、试验工况	170
二、测流条件	101	三、施测要求	170
三、漏水流量测量	102	四、最优协联关系的求取	171
四、测流准备	103	五、数据计算与成果整理	172
五、测流实施	107	第五章 热力学法	174
六、流量计算	109	§1-5-1 概述	174
七、测流成果	113	§1-5-2 测量方法和要求	175
§1-3-3 示踪法	115	一、测量方法	175
一、概述	115	二、测量要求	177
二、等速注入法	116	三、测量装置的要求	178
三、传输时间法	126	§1-5-3 测量修正项	179
§1-3-4 超声波法	133	一、局部流量测量	179
一、概述	133	二、进口总能量的不稳定性	180
二、测量原理	133	三、壁与外界热交换	180
三、装置安装与调整	138	四、水与周围空气的热交换	181
四、测量误差	139	五、其他影响因素	181
五、7400超声波流量计及效率监测系统	140	第六章 试验结果的计算与误差分析	187
§1-3-5 蜗壳差压法	143	§1-6-1 试验结果的计算	187
一、概述	143	一、效率试验有关曲线的计算	187
二、测流原理	143	二、率定蜗壳流量计常数值的计算	190
三、差压的选取	144	三、按二次抛物线进行曲线拟合的	
四、测量装置	145	计算	192
五、蜗壳压差测量	150	四、水轮机效率试验成果表	194
六、蜗壳流量计的率定及误差分析	152	§1-6-2 试验结果的误差分析	194
§1-3-6 其他方法	153	一、效率试验中有关误差的说明	194
一、堰测法	153	二、水轮机效率试验中的误差计算	195
二、毕托管法	156	三、蜗壳流量计测流率定常数值的	
三、差压装置法	160	误差	199
第四章 相对效率测定	162	第二篇 水力机组的稳定性试验	
§1-4-1 概述	162	第一章 概论	201
§1-4-2 测试原理	163	一、稳定与不稳定概念	201
§1-4-3 测量装置与成果计算	164	二、水力机组振动、摆度规范	202
一、相对流量测量装置	164	三、水力机组运行稳定性的试验目的、	
二、测量方法	167	意义	202
三、成果计算	167		

四、现场测量振动、摆度、压力脉动的 几种方法·····	204	二、试验用仪器、工具·····	238
第二章 用应变测量技术测振动、 摆度、压力脉动·····	213	三、试验方法·····	238
§2-2-1 应变片电测技术简介·····	213	§2-4-3 动平衡·····	240
一、原理·····	213	一、动平衡的基本公式·····	240
二、应变片结构及类型·····	214	二、动平衡试验·····	241
三、应变片的工作特性·····	214	第五章 引起机组振动的可能原因 及其处理·····	244
四、测量电路图·····	216	第六章 噪声测量·····	247
§2-2-2 试验前的准备工作·····	217	§2-6-1 基本概念·····	247
一、测点布置·····	217	一、噪声·····	247
二、测点支架、信号电缆·····	218	二、有关噪声的规定·····	247
三、应变梁制作及安装·····	219	三、机械设备中噪声起因·····	247
四、压力传感器配置·····	220	四、评价噪声的技术参数·····	248
五、模拟试验·····	222	§2-6-2 噪声测量方法·····	249
§2-2-3 现场稳定性试验·····	224	一、原理、测量仪器及方框图·····	249
一、目的·····	224	二、测量方法·····	250
二、试验条件·····	224	第三篇 调速系统及机组 过渡过程试验	
三、试验方法·····	224	第一章 概论·····	252
第三章 试验结果整理、分析·····	226	§3-1-1 调速系统典型框图·····	252
§2-3-1 振幅分析·····	226	§3-1-2 国产水轮机调速器的分类 及型号·····	254
§2-3-2 振频分析·····	227	一、分类·····	254
一、振频计算·····	227	二、型号·····	255
二、主振频及各种频率的确定·····	227	第二章 调速器现场测试技术·····	257
三、频率变化规律分析·····	228	§3-2-1 测试内容及原理·····	257
§2-3-3 相位分析·····	228	§3-2-2 调速器试验中常用传感器 及其性能·····	259
一、各信号相位的确定方法·····	228	一、线位移测量传感器·····	259
二、各测量值间相位差分析·····	229	二、压力、压差及真空测量传感器·····	261
三、相位变化规律分析·····	230	三、机械转速测量转换部件及仪表·····	262
§2-3-4 综合分析·····	230	§3-2-3 调速系统中主要参数的电测 接线方式·····	265
§2-3-5 误差分析·····	232	第三章 机械液压调速器的元件特性 调整及静特性试验·····	266
一、稳定性试验误差特点·····	232	§3-3-1 飞摆的调整与试验·····	266
二、稳定性试验可能产生误差的因素·····	232	一、飞摆的调整·····	266
三、综合误差及对成果分析的影响·····	234	二、飞摆的逸速试验·····	267
四、减少动态测试误差的方法·····	234	三、飞摆静特性试验·····	267
第四章 静平衡和动平衡·····	236	§3-3-2 缓冲器特性试验及调整·····	270
§2-4-1 概述·····	236		
一、静平衡·····	236		
二、动平衡·····	236		
三、平衡原理·····	236		
§2-4-2 静平衡·····	237		
一、试验条件·····	237		

一、试验前的准备·····	270	二、缓冲回路 b_f 值、负载、空载切换比 ζ 及 T_d 值校正试验·····	314
二、缓冲器调整试验·····	271	三、电气协联装置的调整试验·····	314
三、缓冲器静特性试验·····	272	§3-4-4 电液转换器的调整试验·····	316
四、机组过水系统的水流加速时间 常数 T_w ·····	277	一、电液转换器的调整·····	316
§3-3-3 传动杠杆及调差机构的 调整试验·····	277	二、电液转换器静特性试验·····	316
一、传递杠杆的空程测量·····	278	三、电液转换器油压特性试验·····	319
二、传递杠杆的水平位置调整·····	279	§3-4-5 DT-100型电液调速器静 特性试验·····	320
三、调差机构的调整试验·····	279	一、试验要求·····	320
§3-3-4 主配压阀和主接力器的 调整试验·····	281	二、试验方法·····	321
一、主配压阀的调整·····	281	第五章 水轮机调速系统的动态 特性试验·····	324
二、主配压阀和主接力器特性试验·····	281	§3-5-1 水轮机调速器动态特性及其 品质指标·····	324
§3-3-5 控制机构的调整试验·····	290	一、水轮机调速系统的稳定性·····	325
一、开度限制螺母的调整·····	290	二、调速系统的速动性·····	325
二、导叶开度指示红针、黑针协调 动作调整·····	290	三、调速器系统的准确性·····	325
三、启动装置的调整及试验·····	291	§3-5-2 机组的过渡过程试验概述·····	326
四、变速机构的调整及试验·····	292	一、试验的意义和目的·····	326
五、调速器电气接点联动试验及控制 电机的动作时间测定·····	293	二、试验工况·····	326
§3-3-6 机械协联机构的调整试验·····	294	三、机组过渡过程的主要技术要求·····	327
§3-3-7 调速器静特性试验及品质 指标·····	296	四、瞬时工况下水力机组参数的 近似转换·····	328
一、调速器系统的静特性及 品质指标·····	296	§3-5-3 机组过渡过程现场试验·····	330
二、调速器静特性试验·····	300	一、试验特点与总要求·····	330
第四章 电液调速器静态调整试验·····	302	二、试验准备及注意事项·····	331
§3-4-1 DT-100型电调各电气调节 部件的调整试验·····	302	三、试验内容、方法与资料的分析整理·····	332
一、测频回路静特性试验·····	302	§3-5-4 影响机组过渡过程的诸因素·····	362
二、旋转变压器输出静特性试验 及调整·····	307	一、调节规律的影响·····	362
三、缓冲回路的调整试验·····	308	二、起始和终了运行条件对机组过渡 过程的影响·····	368
四、频率给定范围及50Hz位置的整定·····	311	三、转轮室补气对机组过渡过程的 影响·····	368
五、调差回路的极性和刻度校验·····	311	四、水力机械参数对机组过渡过程 的影响·····	369
§3-4-2 DT-100型电调的机械 液压平衡试验·····	312	五、调节参数对机组过渡过程的影响·····	369
§3-4-3 JST-100型电调的部分 电气环节静特性试验·····	312	§3-5-5 过渡过程常见故障及其 处理·····	370
一、测频回路静特性试验·····	313	一、机组起动异常·····	370
		二、空载扰动过程中出现大波动·····	370
		三、甩负荷后接力器的大幅度摆动·····	370

四、机组上抛·····	371
五、蓄能机组水泵工况运行时 不能抽水·····	371
六、过渡过程中的强水压脉动·····	372
七、机组稳定性异常·····	372

第四篇 机组力特性试验

第一章 概论·····	374
§4-1-1 力特性试验的意义、目的和 内容·····	374
一、试验的意义与目的·····	374
二、现场力特性试验的主要内容·····	374
§4-1-2 实验应力分析方法及测量 原理·····	375
一、电测法·····	375
二、光弹贴片法(光敏涂层法)·····	376
三、脆性涂层法·····	376
四、激光散斑干涉法·····	376
§4-1-3 电测法在力特性试验中的优点 与国产应变仪的主要数据·····	377
一、电测法优点·····	377
二、国产应变仪主要数据表·····	377
§4-1-4 力特性试验中电阻应变片的 选择·····	377
一、按试验环境选择·····	377
二、按测试应变的性质选择·····	377
三、按试件状况选择·····	381
四、按测试精度选择·····	381
§4-1-5 力特性试验中应变片粘结剂 的选择及粘贴工艺·····	382
一、粘结剂选择的一般原则·····	382
二、水力机组力特性试验对粘结剂的 具体要求·····	383
三、力特性试验中常用的市售成品胶 及其粘贴工艺·····	383
四、部分应变片与粘结剂的组合特性·····	385
五、应变片的粘贴质量检查·····	385
§4-1-6 动态应变测试过程中部分 测试量的标定·····	387
一、应变量的标定·····	387
二、应变—外力关系的标定·····	387

三、水压和油压的标定·····	388
四、大基数(静应变或静压力)小变化量 (动应变或动压力)测量时的标定·····	388
五、用应变梁系统测量部件振动或 摆度时的标定工作·····	388
六、用电涡流式振幅位移测量仪测量 振幅、位移时的标定工作·····	388
§4-1-7 力特性试验中测试量的修正·····	388
一、导线电阻影响的修正·····	388
二、灵敏系数影响的修正·····	389
三、应变片电阻值影响的修正·····	389
四、零点漂移的修正·····	390
五、减少横向效应的方法·····	390
六、测试量的总修正·····	390
§4-1-8 力特性试验中一般的测试 接线方法及其应力计算·····	390
一、构件形状和受力均简单时应力、 应变测量接线及计算·····	390
二、应变花测量主应力的接线与计算·····	390
三、主应力的计算方法·····	391
§4-1-9 应变片及应变花的防冲、 防潮处理·····	396
一、防潮剂的配置·····	396
二、应变片、应变花粘贴部位防潮处理 的要求及防潮剂的涂抹工艺·····	397
三、应变片、应变花的防冲,防压力 水浸入的专用防冲防潮盒·····	398
第二章 非旋转部件的力特性测量·····	399
§4-2-1 金属蜗壳的应力测量·····	399
一、测试目的及原理·····	399
二、测试方法·····	399
三、浇筑混凝土前金属蜗壳的应力及 变形测量·····	400
四、运行前机组蜗壳的应力测量·····	403
五、运行蜗壳的应力测量·····	406
§4-2-2 大部件的刚度、强度测量·····	407
一、试验目的及原理·····	407
二、试验方法·····	408
§4-2-3 水斗式机组引水总管的 应力测量·····	410
一、试验目的及原理·····	410
二、安全性分析及强度复核计算·····	411

三、试验方法·····	411	四、使用情况与测试实例·····	446
四、试验结果的分析整理·····	416	第四章 水轮机进水阀门的动水	
§4-2-4 水轮机导叶及轴流转桨式		启闭试验·····	447
桨叶的力特性试验·····	420	§4-4-1 蝴蝶阀的动水启闭试验·····	447
一、测试目的及原理·····	420	一、试验目的和原理·····	447
二、试验方法·····	420	二、试验的可行性分析与加固减振措施·····	447
三、导叶力特性的测量与计算·····	420	三、试验方法·····	449
四、桨叶力特性的测量与计算·····	422	四、测试结果的分析计算·····	454
§4-2-5 导叶的自关闭试验·····	424	§4-4-2 球型阀的动水启闭试验·····	457
一、试验目的和原理·····	424	一、试验目的和原理·····	457
二、试验方法·····	424	二、试验前的分析计算工作·····	458
三、试验成果的分析整理·····	426	三、试验方法·····	458
第三章 旋转部件的应力应变测量·····	427	四、试验结果的分析整理·····	460
§4-3-1 引电器·····	427	第五章 力学测量的计算机数据	
一、旋转部件测试的要求·····	427	处理简述·····	461
二、引电器的分类及要求·····	427	§4-5-1 静态应力、应变测量数据	
三、水力机组测试中引电器的应用简况·····	427	计算机处理·····	461
四、接触式引电器结构介绍·····	428	§4-5-2 动态力学测量数据处理·····	462
五、改善接触式引电器性能的		一、讯号分类·····	462
一些方法·····	430	二、数据处理框图·····	462
§4-3-2 主轴力特性的测量·····	431		
一、主轴扭矩的测量·····	431	第五篇 机组轴承试验	
二、轴身与法兰连接部位局部应力		第一章 概论·····	465
的测量·····	432	§5-1-1 轴承试验的目的和意义·····	465
三、主轴力特性综合测量系统·····	433	一、轴承试验的意义·····	465
四、主轴力特性的近程遥测·····	434	二、轴承运行试验的目的·····	465
§4-3-3 混流式转轮的应力测量·····	434	§5-1-2 轴承运行故障一般原因·····	468
一、测试目的及原理·····	434	一、轴承运行因素·····	468
二、试验方法·····	434	二、轴承运行故障一般原因·····	468
三、测试结果的整理分析·····	438	§5-1-3 机组轴承试验的结构分析·····	470
§4-3-4 轴流式转轮的应力测量·····	440	一、机组导轴承·····	470
一、测试目的和原理·····	440	二、推力轴承·····	472
二、测量信号的引出及测点布置·····	440	§5-1-4 轴承试验的基本要求·····	474
三、试验仪器、仪表的选择·····	441	一、试验机组的要求·····	474
四、试验水头及协联情况要求·····	441	二、被试瓦的选择和要求·····	475
五、试验程序·····	441	三、轴承试验工况的要求·····	475
六、试验结果的计算分析整理·····	442	四、试验仪器和测量数据的要求·····	475
§4-3-5 力特性试验中近程遥测技术		§5-1-5 机组轴承试验的项目和内容·····	476
的应用·····	443	一、轴承试验的项目和内容·····	476
一、工作原理·····	443	二、轴承试验的有关参数·····	477
二、遥测系统的分类·····	443	第二章 油膜厚度的测试·····	482
三、应变遥测中的要求·····	444		

§5-2-1 轴承油膜厚度的一般概念	482	一、拟定试验大纲	520
§5-2-2 轴承油膜厚度的测试 目的和意义	482	二、测试仪器的选择和检验	520
§5-2-3 油膜厚度的测试原理 及方法	483	三、现场测试准备	521
一、油膜厚度测试原理	483	§5-4-5 油膜压力试验工况与程序	522
二、油膜厚度测试方法	484	一、试验工况	522
§5-2-4 油膜厚度的测试准备	489	二、试验程序	522
一、拟定试验大纲	490	§5-4-6 资料整理与成果分析	522
二、测试仪器的选择和检验	490	一、资料整理	522
三、现场准备	490	二、成果分析	523
四、测量准备	491	第五章 推力轴承(导轴承) 负荷试验	526
§5-2-5 试验工况与程序	491	§5-5-1 推力轴承(导轴承)负荷的 一般概念	526
一、试验工况	491	§5-5-2 推力轴承(导轴承)负荷测量的 目的和意义	526
二、试验程序	491	§5-5-3 测试项目和内容	527
§5-2-6 资料整理与分析计算	492	§5-5-4 轴承负荷测试原理及方法	527
一、资料整理	492	一、轴承负荷	527
二、分析计算	495	二、轴向水推力	532
第三章 轴承温度的测试	498	三、镜板镜面不平度的测试	538
§5-3-1 轴承温度测试的目的和意义	498	§5-5-5 试验准备	539
§5-3-2 轴承温度测试的原理及方法	498	一、试验仪器设备	539
一、轴承温度测试原理	498	二、现场测试准备	539
二、轴承温度测试方法	500	§5-5-6 试验工况和程序	540
§5-3-3 轴承温度的测试准备	504	一、试验工况	540
一、拟定试验大纲	504	二、试验程序	540
二、测试仪器的选择和校验	505	§5-5-7 资料整理和成果分析	541
三、现场测试准备	505	一、资料整理	541
§5-3-4 轴承温度测试工况和程序	506	二、成果分析	543
一、试验工况	506	附录一	545
二、试验程序	506	附录二	546
§5-3-5 资料整理和成果分析	506	第六章 推力轴承高压油顶起装置和 水冷瓦的效率试验	547
一、资料整理	506	§5-6-1 试验的意义和作用	547
二、成果分析	508	§5-6-2 试验项目和内容	547
三、误差分析	509	§5-6-3 试验设备及测量方法	548
四、附录	511	一、试验设备	548
第四章 轴承油膜压力的测试	515	二、测试方法	549
§5-4-1 油膜压力的一般概念	515	§5-6-4 高压油顶起装置和水冷瓦的 试验准备	551
§5-4-2 油膜压力测试的目的和意义	515	一、拟定试验大纲	551
§5-4-3 油膜压力的测试原理及方法	515	二、测试仪器的准备	551
一、测试原理	515		
二、测试方法	517		
§5-4-4 油膜压力测试准备	520		

三、现场测试准备.....553	一、防护的目标.....595
§5-6-5 试验工况与程序.....553	二、防护的主要方法.....595
一、试验工况.....553	§6-3-2 常规方法——堆焊.....597
二、试验程序.....554	一、堆焊工艺.....597
§5-6-6 资料整理与计算分析.....555	二、堆焊变形.....609
一、资料整理.....555	三、质量标准.....611
二、计算分析.....555	§6-3-3 金属保护层.....611
	一、氧乙炔焰合金粉末喷焊.....612
	二、等离子喷涂.....621
	三、渗铝及表面硬化.....623
	四、抗磨焊条.....625
	五、金属陶瓷.....627
	§6-3-4 非金属涂层.....628
	一、环氧金刚砂.....628
	二、复合尼龙.....632
	三、聚氨酯.....634
	四、搪瓷.....638
	§6-3-5 其他措施.....639
	一、合理选材.....639
	二、结构改进.....642
	三、制造工艺改进与表面光洁度.....644
	四、合理运行及维修.....646
第六篇 气蚀、磨损与防护	第四章 裂纹的检查及处理.....648
第一章 气蚀和磨损的观测.....561	§6-4-1 概述.....648
§6-1-1 概论.....561	一、裂纹形成的主要原因.....650
一、气蚀和磨损的定义.....561	二、裂纹的危害性.....651
二、气蚀和磨损观测的目的及意义.....561	三、裂纹检查及处理的意义.....651
§6-1-2 气蚀的观测方法.....562	§6-4-2 裂纹检查的方法.....652
一、声学法.....562	一、磁粉探伤法.....652
二、电阻法.....568	二、渗透探伤法.....655
三、加速度计法.....570	三、超声波探伤法.....658
四、易损覆盖层法——快速破坏法.....572	§6-4-3 裂纹处理.....660
§6-1-3 气蚀的检查评定.....574	一、准备工作.....660
一、资料积累.....574	二、坡口形式及要求.....661
二、气蚀损坏量的测量和计算.....576	三、预热.....662
三、气蚀损坏评定标准.....577	四、焊补工艺.....663
附录.....578	五、消除内应力的措施及质量检查.....663
§6-1-4 磨损的观测、磨损量的测量和评定.....579	参考文献.....665
一、资料积累.....579	
二、磨损的观测方法.....581	
三、磨损量的测量和评定.....584	
第二章 叶型测绘和修型.....587	
§6-2-1 目的意义.....587	
§6-2-2 叶片型线的测绘.....587	
一、混流式水轮机叶型测绘.....587	
二、转桨式水轮机叶片型线的测绘.....591	
§6-2-3 叶片修型.....592	
一、修型样板的确定.....592	
二、修型工艺及要求.....594	
第三章 气蚀和磨损的防护措施.....595	
§6-3-1 目的意义.....595	

总 论

一、水力机组现场试验的目的和意义

(一) 水力机组现场试验的概念

水电站的水轮发电机组，水泵站的水泵—电动机组，以及抽水蓄能电站的可逆机组通常称为水力机组。在现场对这些机组进行的各种试验称为水力机组的现场试验或水力机组的原型试验。在水电厂现场对水轮发电机组进行的各种试验，称为水电厂水力机组现场试验。

(二) 水力机组现场试验的特点

- 1) 可以做模型试验不能模拟的试验;
- 2) 可以正确了解机组在电气、机械、水力等方面的运行特性，鉴定水力机组的各种工作参数;
- 3) 检验水力机组的理论、计算方法;
- 4) 是鉴定水力机组的设计是否合理、制造和安装质量优劣的有效手段和可靠依据。

(三) 水力机组现场试验的主要作用

- 1) 比模型试验更能发现和解决生产和科研中提出的问题;
- 2) 根据机组现场试验的资料积累，能为发展新型结构和新型机组提供技术资料;
- 3) 通过机组现场试验能经济有效地利用水源;
- 4) 能为系统安全经济发供电提供可靠的运行资料，正确地指导水电厂的生产。

二、现场试验的内容和分类

(一) 内容

根据机组的安全经济运行和可靠性要求，水力机组现场试验的内容和目的可分以下几个方面:

- 1) 反映机组能量特性及水电厂优化方面的试验;
- 2) 反映调速系统和调速器性能，以及因调速器和机组性能引起的机组过渡过程方面的试验;
- 3) 反映机组安全运行的稳定性方面的试验;
- 4) 反映机组主要设备部件的结构、运行性能和力学特性方面的试验;
- 5) 反映机组轴承结构运行性能及润滑特性方面的试验;
- 6) 反映机组过流部件的气蚀磨损特性方面的试验。

(二) 分类

1. 一般分类情况

(1) 按机组设备分：可分为水轮机试验、电气试验、电机试验以及调速系统试验。

(2) 按专业性质分：可分水机试验和电气试验。

2. 本《手册》分类原则

本《手册》重点叙述水电厂水力机组现场试验的水机试验（包括水电厂水轮发电机机械部分）。按照机组现场试验的内容、目的和方法，水机试验主要包括水轮机的效率试验、机组稳定性试验、调速器系统试验、机组过渡过程试验、机组的力学特性试验、机组的轴承试验和水轮机气蚀磨损及裂纹试验。

详细内容和分类见图0-1。

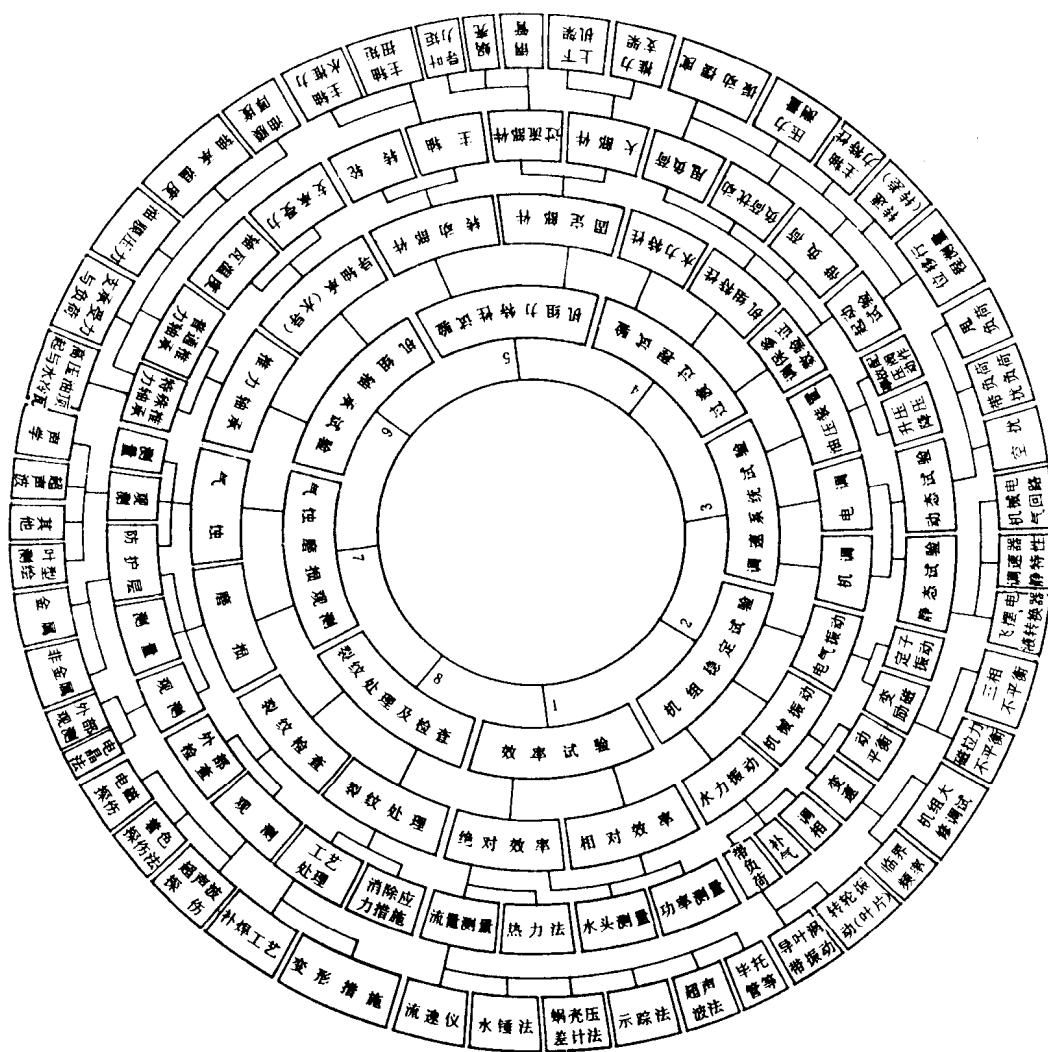


图 0-1 水力机组现场测试内容及分类

上述试验的内容和项目,具体试验时需要根据现场机组运行的具体情况而定,即根据水电厂每次试验的目的和要求定出试验条件、内容、工况程序以及测试方法。有的可单独进行,有的可同时进行。

三、现场试验的主要测试参数和测试方法

(一) 主要测试参数

水力机组现场测试参数,按其测试的对象和性质可分为电气参数、机械参数、水力参数、调节参数、热量参数。所测参数的名称和数量与试验内容有关,不同的试验内容,有不同的测试参数和数量,经常测试的参数有以下几种:

(1) 电气参数:包括机组功率,系统频率,发电机的主极频率等。

(2) 机械参数:机组转速;机组位移量,如主配压阀开口、接力器行程(或导水叶开度)、轮叶行程、抬机量等;振动量,如机组振动摆度幅值和频率;轴承的油膜厚度和压力;气蚀的深度、面积和体积。

(3) 水力参数:机组过流部件的压力,例如压力管道的压力、蜗壳压力、顶盖(支持盖)的压力、尾水管压力、迷宫环压力等,尾水管真空和压力脉动,机组的水位和水头,流量或流速。

(4) 力学参数:大部件(包括固定部件和过流部件)的应力或应变,主轴的轴向水推力和扭矩,导水叶力矩,轴承(推力轴承)负荷和支撑部件受力等。

(5) 调节参数:包括调速系统的静态特性和动态特性品质指标。

静态特性参数有机调飞摆的比例度和单位比例度,电调的电液转换器的比例度和最大不灵敏度,调速器的不准确度和不灵敏度。

调速器调节参数有永态转差系数,暂态转差系数,缓冲时间常数,局部反馈系数以及杠杆比等。

动态特性参数除机组的转速、位移量和水力参数的蜗壳压力、尾水管真空外,还有调速器的不动时间,波动次数,调节时间以及接力器的超调量等。

(6) 热量参数:如轴承(推力轴承)瓦温、油温以及机组冷却水温等。

(二) 测试方法

水力机组现场试验按所依据的测试原理、试验内容、测试系统,其测试方法可归纳表0-1所述的分类。

表0-1所述的方法,对于水力机组现场试验来说,主要的、大量的应用非电量的电测法。

非电量的电测法的工作过程可归纳为转换→放大→显示记录→数据处理4个主要环节,其基本原理是:首先利用各种传感器将被测的非电量转换成电量,然后运用电量测量技术,将微弱的电量进行放大,整流,输送到适当的测量电路和显示记录仪表将此电量测量出来。显示记录仪表的指示值 X 反映被测非电量 Y 的大小,即有函数关系 $Y = f(X)$,

表 0-1

水力机组现场测试方法分类

序号	测试方法 分类依据	测试方法	主要特征	优缺点
1	按 测 试 原 理 分	机械测试方法	用简单测量工具或机械式仪表由观测者对被测参数直接读数,如水尺测量水位、压力表测量水位、千分表测量位移和振幅等	1.只能读被测参数的稳定值,而不能测读瞬时的变化值; 2.测读数值不能自动记录,不能遥控和遥测; 3.测读精度差,误差较大
		电气测试方法	被测参数的本身是电量,用相应的仪器直接测试和显示或经电量转换器(如电压—电流转换器,频率—电流转换器)测量和显示	1.灵敏度高; 2.动态性能好,能测试各种参数随时间的变化过程; 3.能自动显示和记录,便于与计算机联用; 4.精度较高,误差较小
		非电量的电测法	被测参数均为非电量,即将被测非电量参数通过各种传感器转成电量信号,经放大器放大传送到显示仪器和记录仪表	
2	按 测 试 内 容 要 求 分	静态测量	机组在稳定工况下,精确地测量被测参数的稳定值,即所测参数为机组稳定工况下的运行平均值	1.要求仪表有较高的等级; 2.测量仪器只能选用静态的,如静应力的测量只能使用于静态电阻应变仪
		动态测量	机组在工况过程中,测量被测参数随时间的变化过程,即测出各个参数值随时间变化过程、某一时间出现的特征值的大小以及各个参数在过渡过程中的相互关系	1.测量精度较次于静态测量; 2.测量仪器应有良好的动态性能; 3.动态测量是了解运行机组性能和特点的重要手段
3	按 现 场 测 试 系 统 分	目测系统	我国当前水力机组现场测试方法所形成的测试系统(由机械测试方法和电测法所组成的测试系统)	1.测试精度和误差,与自动测试系统相比较次; 2.人工进行数据处理和分析,效率比较低
		半自动测试系统	测试数据的获得、数据处理以及结果显示记录均由计算机自动完成,但测量仪器的操作和调正仍需测试人员完成	1.误差小(主要是系统误差),精度高; 2.节省劳力工时,成果快,效率高; 3.所测数据计算、图表曲线准确可靠; 4.属国内外先进测试技术
		自动测试系统	在测试过程中,从测试仪器设备的接入、数据获得、数据处理,一直到试验结果的显示和通报,均由测试系统自动完成,测试人员不需介入	

$Y = f(x)$ 通常被称作非电量电测系统的标定特性(或称率定特性)。确定函数关系 $Y = f(x)$ 的方法称为电测系统的标定方法。标定特性 $Y = f(x)$ 的图形是一条通过坐标原点的直线。此时直线 $M = Y/X$ 为一常数,称之为非电量的标定比例尺,它表示仪表的单位指示值所代表的被测非电量的大小。试验前非电量的测量标定了比例尺 M , 则可根据显示记录仪表的指示值 X , 求出被测物理量 $Y = MX$ 。

概括起来,非电量电测系统主要包括 6 个基本单元:

- (1) 转换单元:即传感器或转换器,它是该系统的核心元件;
- (2) 放大测量单元:试验常用的放大器如动态应变仪等,或称信号调节器;