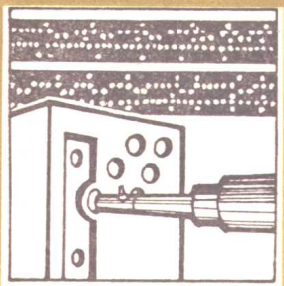
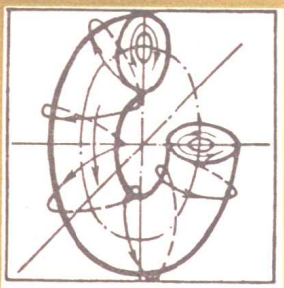


高等学校试用教材



水力机械测试技术

华中工学院李建威 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

水力机械测试技术

华中工学院李建威 主编



机械工业出版社

水力机械测试技术

华中工学院李建威 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 ·印张17 1/4 ·字数 424 千字

1981年7月重庆第一版·1981年7月重庆第一次印刷

印数0,001—3,200·定价1.80元

*

统一书号: 15033-5052

前 言

测试技术——一门新兴的技术科学，作为试验技术的核心它在科学研究特别是应用研究中起着重要的作用。正确地选择测试手段、测量方法并准确地进行数据处理，现已成为工科院校毕业生从事创造性工作的重要基本技能。为了培养水力机械专业学生的试验研究能力，适应我国四个现代化的需要，《水力机械测试技术》已被列为水力机械专业的必修课。

本书是根据一九七八年四月“高等学校一机部对口专业座谈会”精神以及一九七八年九月“水力机械专业教材编审会议”所拟定的教学大纲编写的。主要内容包括：水力机械模型试验中应用的相似理论，试验与电测的基本知识，水力机械各项水力参数的测量，各种反映水力机械外部总体性能的外特性和反映其内部流动规律的内特性的测定，以电子计算机为中心的综合测试系统在水力机械试验中的应用以及水力机械试验中测量误差的计算和试验数据的处理等。由于传统的测试方法仍然是目前广泛采用的基本方法，电测技术是现代测试的基础，内特性测试则是目前试验研究中的薄弱环节，因此，本书在阐述传统测试方法的基础上，对水力机械试验中的电测技术和水力机械内特性的测定方法重点进行了阐述。本书突出专业性的测试技术并以模型试验的测试为主，对水电站水轮机和泵站水泵的实测也适当作了介绍，同时也述及某些必要的预备知识。书中带*及小字部分为参考性内容。

本书是高等学校水力机械专业的教学用书，也可供从事水力机械试验研究的工程技术人员参考。

本书由华中工学院李建威同志主编，并负责编写第二、三、六、七、八、十三章；第四、九、十一、十二章由甘肃工业大学陈秉二同志编写；第一、五、十章由华中工学院倪善生同志编写；中国农业机械化科学研究院段桂芳同志也参加了第十二章的编写工作。全书由陈秉二同志主审。

本书在编写过程中得到有关研究所和工厂的大力支持和帮助。哈尔滨大电机研究所刘光宁、仲崇恕、陈泽铨及殷士光工程师对三、六、七、八、十三章的初稿作了审阅。书中许多电测资料引自哈尔滨大电机研究所的各种试验报告；华中工学院程良骏教授、谭月灿副教授、贺昌杰同志分别对二、一、五章的初稿作了审阅；第一机械工业部教材编辑室责任编辑高文龙同志对文稿、图稿做了大量工作，在此一并致以谢意。

参加本书审稿会议的有：中国农业机械化科学研究院、哈尔滨大电机研究所、沈阳水泵研究所、东方电机厂（德阳水轮机电机研究所）、清华大学、成都农机学院以及编审单位的代表。

限于编者的实际经验与理论水平，加之时间仓促，缺点错误在所难免，望读者指正。

本书采用的符号

A	应变电桥桥臂系数、振幅、面积	h	压差、速度水头、堰顶水头、出水边厚度、海拔高度
a	音速、压力波传播速度、回归方程截矩	$h_{\text{吸}}$	吸入管的水力损失
a_0	开度	$h_{\text{动}}$	动力真空
B	堰宽、磁感应强度、摆度	h_c	水头损失
BG	半导体三极管	I	汽蚀侵蚀强度、电流或安培
b	堰宽、测功轮高度、示波图高度、回归系数	J	超声波辐射强度
b_0	电桥臂上并联分流电阻后产生的波高	K	应变片灵敏系数、蜗壳压差计系数、互感器变比、压电常数、比例系数、自由度、流量计修正系数、应力集中系数
C	电容、流速分布不均匀系数、水堰流量系数、离心力、电表刻度常数	K_N	最大误差法系数
c	比例常数	k	绝热指数、涡轮流量计系数、速度水头系数、空泡数、电磁耦合系数、安全余量
Ca	柯西数	L	距离、测功臂长
D	直径、堰底至堰口下缘距离	L_p	声压级
d	直径	M	弯矩、转矩
dB	分贝	Ma	马赫数
d_N	极差系数	M_i	单位力矩
E	弹性模数、电压	m	质量、节流件截面比
Eu	欧拉数	N	功率、能量、测量次数、数目
e	自然对数的底	N_i	单位功率
F	面积、作用力	Ne	牛顿数
Fr	佛鲁德数	n	转速、应变片数、指针摆动次数
F_0	节流装置的开孔面积	n_i	单位转速
f	频率、函数	n_s	水轮机和水泵的比转速
f_D	激光多普勒频率	P	压力、轴向力、功率、测功荷重、概率、电机磁极对数、声压
G	抗剪模数、重量	P_i	单位轴向力
g	重力加速度	$\bar{P}$	压力系数
g_1	当地重力加速度	P_h	静压力
H	水头或扬程	P_0	轴心处的压力、基准声压
$\bar{H}$	平均水头	P_N	取样水的盐浓度
H_g	泵的几何安装高度	P_N	水池中的盐浓度
H_h	净水头	Q	流量
H_o	虎克数	Q_i	单位流量
H_s	水轮机的吸出高度、泵的吸上真空高度		
H_z	水轮机的几何安装高度		

q	漏水量	Δs	位移量
R	电阻值、极差、半径	ΔP	气压计修正值、压力差、马达-天平的最小荷重、功率损失
Re	雷诺数	δ	间隙、厚度、随机误差、相对误差
R_c	已知电阻	$\bar{\delta}$	随机误差的平均值
R_p	分流电阻	$\delta_{\sigma y}$	函数 y 的相对均方根误差
r	导线电阻	$\delta_{\Delta y}$	函数 y 的相对极限误差
St	斯特洛哈数	e	应变量、全宽堰修正系数
s	回归方程标准残差、传感器灵敏度、频谱密度、倾斜压力计读数	$[e]$	允许应变量
T	周期、格拉布斯准则允许的偏离值	η	效率
t	温度、时间、学生氏分布	η'	不包括机械损失的效率
μ_{FS}	传感器满量程输出值	θ	机械位移的弧度、相位差角、两束入射激光的夹角、角度
u	圆周速度、电压	λ	激光波长
V	容积、速度矢量、伏特	μ	波桑系数、粘性系数、流束收缩系数、涡带频率与转动频率之比
v	速度	ν	运动粘性系数
W	梁的抗弯断面系数、相对速度、瓦特、重量、电位器	ξ	摩擦系数
x	变量、测量值	π	圆周率
$\bar{x}$	算术平均值	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	组成相似准则的无量纲积—— π 数
y	函数	ρ	密度
Z	总测点数、数目、距离、复阻抗	σ	汽蚀系数、托马数、均方差
z	复阻抗的模数、径向支臂上的测点数	$[\sigma]$	应力
Z_N	肖维纳准则系数	σ^2	方差
α	指数、特征尺寸比、液流斜角、倾斜角、显著性水平、可控硅控制角、轴面速度分布的不均匀系数、主应力的方向角、单位波高的应变值	$\hat{\sigma \bar{x}}$	有限次测量时取样平均值的均方差
β	指数、载荷比	τ	剪应力
γ	水的重度、材料比重、或然误差、相关系数、角度	Φ	表征压力脉动频率相似性的无因次量
γ_i	压电晶体灵敏度	φ	叶片安放角、水中叶片固有频率的压缩系数、液流转角、纬度、包角、阻抗角
Δ	所述参数的增量(或差值)、误差限(不确定度)、通流部件绝对粗糙高度	Ψ	表征压力脉动振幅相似性的无因次数
Δh	水泵的装置汽蚀余量、双振幅、压差	ψ	取压系数
Δh_r	水泵汽蚀余量	Ω	欧姆
ΔL	弹性变形量、电感增量	Ω	动量矩
Δ_L	传感器线性差值	ω	角速度、角频率
Δ_H	传感器迟滞值	∇	海拔高度

其他下标的符号或文字

1、2	水力机械进口、出口, 序号	配	配套的
3、5	尾水管进口、出口	入	输入的
1, 2, ... <i>N</i>	测量序号	全	全压的
0、45、90	0°、45°、90°	静	静压的
<i>a</i>	大气的、工作的	水	水压的、水的
<i>b</i>	补偿的、汽化压力的	离	离心力
<i>cp</i>	平均值	合	综合的
<i>F</i>	发电机的	极	极限的
<i>f</i>	飞逸的	温	温度的
<i>I</i>	电流的	纵	纵向的
<i>i</i>	试件的、测点序号	横	横向的
<i>k</i>	临界的、极限的	汞	水银的
<i>L</i>	拉伸的	涡	涡带的
<i>m</i>	模型的、扭转的、轴面的、试验的	高	海拔高重力的
max	最大的	器	仪器误差的
min	最小的	纬	纬度重力的
NaCl	盐	修	修正的
0	容积的、同步的	标	标定的
<i>p</i>	装置的、水泵的	使	使用的
<i>r</i>	径向的、输入的	额	额定的
<i>s</i>	水力的	机	机械的
<i>T</i>	水轮机的	电	电气的
<i>t</i>	原型的、额定的	优	最优的
<i>u</i>	圆周的	转	转速的
<i>V</i>	真空的、电压的	叶	叶片的
<i>W</i>	弯曲的	导	导叶的
上	上游的、上限的	卡	卡门涡列的
下	下游的、下限的	差	压差计的
中	中心频率的	表	仪表的
出	输出的	段	机组段的
效	有效的		

目 录

本书采用的符号

第一章 概 论	1
§ 1-1 测试技术在水力机械中的地位及 发展趋势	1
§ 1-2 水力机械的参数及特性曲线	2
§ 1-3 水力机械试验的种类	9
§ 1-4 水力机械的基本试验装置	11
§ 1-5 测量的分类与测量误差概述	17
§ 1-6 试验中的测量精度及其国 际标准	18
参考文献	21

第二章 水力机械模型试验中应用的

相似理论	22
§ 2-1 流动相似的基本准则及其应用	22
§ 2-2 结构强度的相似定律	28
* § 2-3 水力弹性振动的相似原理	31
* § 2-4 压力脉动现象及水锤现象的 相似性	33
参考文献	36

第三章 水力机械电测基本知识及电

测仪表简明原理	38
§ 3-1 应变测量的基本知识	38
§ 3-2 传感器	48
§ 3-3 电测仪表的简明原理	58
参考文献	70

第四章 水力机械试验中压力的测量 ...72

§ 4-1 液柱式压力计	73
§ 4-2 弹性式压力计	80
§ 4-3 活塞式压力计	82
§ 4-4 电气式压力计	84
§ 4-5 大气压力的测定与修正	87
参考文献	88

第五章 水力机械试验中流量的测量 ... 90

§ 5-1 用节流法和水堰测量流量	90
§ 5-2 涡轮流量计和电磁流量计	100
§ 5-3 流量的校正方法	102
§ 5-4 大流量的测量	103
参考文献	111

第六章 水力机械试验中转速、转矩

及功率的测量	112
§ 6-1 概 述	112
§ 6-2 转速的测量	113
§ 6-3 机械测功器及水力测功器	116
§ 6-4 直流电机测功	119
§ 6-5 马达-天平测功	122
§ 6-6 数字式转矩测量仪	123
§ 6-7 水泵与原型水轮机 功率 的电 测法	125
参考文献	128

第七章 水力机械内特性的测定 ...130

§ 7-1 流体动力测量仪——探针	130
§ 7-2 转轮进、出口速度场的测定	141
§ 7-3 尾水管速度场及压力 脉动 特性 的测定	145
§ 7-4 流场显示方法	151
§ 7-5 激光技术在流场研究中的应用	155
§ 7-6 叶片表面压力分布的测定	157
参考文献	160

第八章 水力机械应力和力特性

的测定	162
§ 8-1 水力机械应变测量中的一般 测试技术问题	162
§ 8-2 模型转轮应力的测定与原型 转轮应力的实测	169

§ 8-3 其他零部件应力的测定	175	第十二章 水力机械试验中的综合	
§ 8-4 水力机械力特性的测定	181	测试系统	233
参考文献	185	§ 12-1 概 述	233
第九章 水力机械振动与噪声的测量 ...	186	§ 12-2 数字测量(模数转换)简明	
§ 9-1 水力机组的振动标准	186	原理	234
§ 9-2 振动的测量方法与分析	189	§ 12-3 综合测试系统简介	236
§ 9-3 噪声的基本概念	198	§ 12-4 水力机械试验中应用综合测	
§ 9-4 噪声的测量	202	试系统的实例	239
参考文献	204	参考文献	242
第十章 水力机械的效率试验与实测 ...	206	第十三章 测量误差的计算和试验	
§ 10-1 水力机械的效率试验	206	数据的处理	243
§ 10-2 水电站与水泵站的实测	209	§ 13-1 误差理论的简明知识	243
§ 10-3 水力机械效率测定的热力学法 ...	212	§ 13-2 指示式仪表误差估算	248
§ 10-4 水力机械实测中的动态测量	215	§ 13-3 误差传递的基本法则及其应用 ...	249
参考文献	218	§ 13-4 综合误差的计算	254
第十一章 水力机械汽蚀的测定	219	§ 13-5 试验数据的处理与数学表示	260
§ 11-1 用能量法测定水力机械的汽		§ 13-6 试验研究中误差的分配	267
蚀特性	219	参考文献	268
§ 11-2 用声学法测定水力机械的汽		附 录	
蚀特性	223	附录1. 一般不用(及禁用)的单位折合	
§ 11-3 汽蚀部位的测定方法和闪频		国际单位制的换算关系	270
技术及高速摄影技术的应用 ...	227	附录2. 与国际单位制并用的有关单位	271
参考文献	231	附录3. 水的物理性质	271
		附录4. 液柱式压力计常用的工作液	272
		附录5. 我国部分城市的大气压力值	272

第一章 概 论

§ 1-1 测试技术在水力机械中的地位及发展趋势

科学的发展与测试技术的发展有密切的联系。测试是人们认识客观事物的重要方法,是通过试验测量和数据处理等基本环节从客观事物取得有关信息量值的重要认识过程。它的准确度、灵敏度以及测试的范围在颇大的程度上决定了科学的发展水平。测试技术达到的水平愈高,则科学的成就也愈为深广。另一方面,科学的发展又为测试技术的发展创立了新的前提、新的途径和新的可能性。

水力机械的发展与水力机械测试技术的发展密切相关。水力机械测试技术水平在一定程度上直接代表了水力机械试验研究的水平。

由于水力机械特别是转轮内的流动极其复杂,到目前为止,只能依靠某些简化的假设来设计转轮并通过模型试验择优选取。要逐步完善现有的水力设计方法,必须进行液流结构等内特性的实测。

为了保证大中型水力机组安全、稳定地运行,对强度、刚度、振动和压力脉动特性进行预先的模拟研究和水电站与水泵站的实测,也是通常采用的基本方法。

随着电子计算机、数学和力学的发展,数学模拟方法得到了推广并且有可能减免某些试验,但它并不能取代物理模拟方法,不能为水力机械提供完整的使用特性。因此,模型和原型试验仍然是获取数据的基本手段。一种新型水轮机或水泵的出现,几乎总是先进行广泛的模拟研究,而后进行产品的设计。在水力机械许多复杂的应用问题中,试验常常是解决问题的基本方法甚至是仅有的方法。例如,汽蚀流动就很难用解析方法研究清楚,在水力机械制造工业中研究汽蚀的基本方法仍然是试验。多年来各国一直采用对水力机械外特性的影响的总体方法(即能量法)来研究汽蚀。近年来,又进一步用试验方法研究水力机械流道几何参数、速度分布、压力分布等对能量和汽蚀性能的影响,测定水力机械在各种工况下的汽蚀形态、汽蚀部位、汽蚀侵蚀强度和水利稳定性。

上述情况表明,试验研究对水力机械理论的发展、性能的确定、设计水平的提高以及复杂的应用问题的解决都具有极其重要的意义。

在一定的试验装置上进行水力机械外特性或内特性的参数测定,须正确地选择测量方法,正确地进行静态或动态取样并准确地进行数据处理。这些正是测试技术所涉及的基本内容。

水力机械发展的历史证明,每当试验及测试技术有所突破,水力机械的基础理论就有所发展,并使一些疑难问题得到解决。例如高速摄影机的发明,促进了汽蚀机理新的假说的出现,高精度电测技术的应用,使转轮设计中微小的改善得到鉴别。这些例子,充分说明测试技术对理论发展的促进作用。另一方面,新的测试技术又总是随着各种试验研究的实际需要而出现和发展。

为了适应水电机组和大型水泵的不断发展,特别是随着水电机组向高水头、大容量发展以及蓄能可逆式机组的出现,世界各国水轮机和水泵制造厂正在不断改进试验设备。在采用较高的试验参数和建立多功能的模拟试验装置的同时,测试技术也在不断完善和现代化。

水力机械测试技术发展的基本趋势主要表现在如下几个方面:

1. 采用高精度、自动化的综合测试技术

水力机械的效率在所有旋转机械中是最高的, 巨型水轮机效率现已达到95%。因此, 为了鉴别水力机械特别是水轮机在设计上微小的改善, 一般要求在试验室内单项参数的测量精度在 $\pm 0.1\% \sim \pm 0.3\%$ 以内或更高。设计上的微小差异对于小型水轮机并不重要, 但对长期连续运转的大型机组来说, 任何效率上微小的改善都具有重要的经济意义。对于单台水泵并不重要, 但考虑千万台水泵的动力消耗就十分可观了。传统的一次测量方法使测量精度的进一步提高受到限制, 不能鉴别设计上的微小改善, 而且一个参数的测量几乎就要安排一个人, 这对于进行长期连续的试验研究是一个沉重负担。如何实现试验过程的自动化已经成为一个重要问题, 因为它是提高科研效率的新的技术基础。要提高测量精度并使参数测量和数据处理自动化, 必须采用以电子计算机为中心的综合测试系统。

综合测试系统应用现代的检测技术、自动化技术和电子计算机及其外部设备自动进行参数测量和数据处理。国外七十年代建立的各种水力机械模拟试验台, 几乎毫无例外地采用了这种装置系统。而且测试系统的精度普遍高于IEC (国际电工会议, 其任务主要是制订国际准标以加强国际间的贸易) 规定的精度。由于它采用巡回检测技术或实时测试, 能快速采样和测及参数的瞬时平均值, 从而使试验数据可靠性高, 试验台的重复性好。这种试验方法和测试方法使得整个试验工作, 可以由1~2个人在短时间内完成。

2. 深入进行内特性方面的测试

深入进行水力机械流道内不同工况下流速分布、压力分布、压力脉动、汽蚀形态、汽蚀强度、汽蚀侵蚀部位等内特性的研究, 对全面预测水力机械的性能、发展水力机械理论和提高设计水平有重要意义, 因此国外一些厂家和有关高等学校对内特性的测试十分重视。目前高速摄影技术、流场显示技术、热膜探针、电子探针以及激光测速仪等新技术和仪表均已得到应用。电子计算机在流态分析中也得到了应用。

3. 用实时频谱分析仪或者用电子数字计算机对随机振动或压力脉动信号进行频谱分析也比较普遍。此外, 动态测试日益受到重视。

随着科学技术的发展, 一些先进的测试技术必将在我国逐步得到应用。

§ 1-2 水力机械的参数及特性曲线

一、水泵和水轮机的基本参数

1. 扬程与水头

水泵的扬程是单位重量液体通过泵之后能量增加的数值。水轮机的水头是它的进口和出口断面上单位重量水的能量差。通常用符号 H 表示, 单位为米水柱, 简称米。

2. 流量

水泵的流量是水泵在单位时间内输送液体的数量。水轮机的流量是单位时间内流过水轮机过流通道水的数量。流量常用符号 Q 表示, 其常用单位有: 升/秒、米³/秒、米³/时、吨/时、千克/秒 (公斤/秒)。

3. 转速

水泵与水轮机的转速是指它们的轴每分钟旋转的次数, 用符号 n 表示, 单位为赫兹, 我

国通常使用转/分。

4. 功率

在单位时间内所作功的大小称为功率。

在水泵行业里常用的功率有：有效功率、轴功率、配套功率三种。

有效功率 $N_{\text{效}}$ 是指单位时间流过水泵的液体从水泵那里所得的能量，它可用下式计算：

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} N_{\text{效}} &= \frac{\gamma QH}{102} \quad (\text{千瓦}) \\ N_{\text{效}} &= \frac{\gamma QH}{75} \quad (\text{马力}) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 γ ——水的重度(公斤力/升)；

Q ——泵流量 (升/秒)；

H ——泵扬程 (米)。

轴功率 N 是指原动机输送给水泵的功率，它的单位是千瓦或马力。

配套功率 $N_{\text{配}}$ 是指一台泵应该选配原动机的功率值。配套功率一般比轴功率大1.1~1.3倍，对于大泵，这个数值取小一些，对于小泵，这个数值取大一些。

水轮机的输入功率 N_v 用工作水头和流量进行计算

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} N_v &= \frac{\gamma QH}{102} = 9.81 QH \quad (\text{千瓦}) \\ N_v &= \frac{\gamma QH}{75} = 13.33 QH \quad (\text{马力}) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

5. 效率

水泵的效率 η 是用来衡量水泵对原动机传来的能量的利用程度。其大小用百分数表示：

$$\eta = \frac{N_{\text{效}}}{N} \times 100\% \quad (1-3)$$

由此可得泵的轴功率为

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{N_{\text{效}}}{\eta} = \frac{\gamma QH}{75\eta} \quad (\text{马力}) \\ N &= \frac{N_{\text{效}}}{\eta} = \frac{\gamma QH}{102\eta} \quad (\text{千瓦}) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

水轮机轴的输出功率 N 与水轮机输入功率 N_v 的比值， η 为水轮机的效率，即：

$$\eta = \frac{N}{N_v} \times 100\% \quad (1-5)$$

根据上式，它的输出功率可写为

$$\left. \begin{aligned} N &= N_v \eta = 9.81 QH \eta \quad (\text{千瓦}) \\ N &= N_v \eta = 13.3 QH \eta \quad (\text{马力}) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

6. 比转速

比转速 n_s 有这样的性质，对一系列几何相似的水轮机或泵，在相似工况下的 n_s 值都相等。

对于单级单吸泵，可用下式计算：

$$n_s = 3.65 n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (1-7)$$

对于多级泵:

$$n_s = 3.65 \frac{n \sqrt{Q}}{\left(\frac{H}{i}\right)^{3/4}} \quad (1-8)$$

式中 i ——多级泵级数。

对于双吸泵:

$$n_s = 3.65 \frac{n \sqrt{\frac{Q}{2}}}{H^{3/4}} \quad (1-9)$$

水轮机的比转速 n_s 可用下式计算:

$$n_s = 3.132 \frac{n \sqrt{Q\eta}}{H^{3/4}} = 3.132 n'_1 \sqrt{Q'_1 \eta} \text{ (米·千瓦)} \quad (1-10)$$

$$n_s = 3.65 n \frac{\sqrt{Q\eta}}{H^{3/4}} = 3.65 n'_1 \sqrt{Q'_1 \eta} \text{ (米·马力)} \quad (1-11)$$

式中 n'_1 ——单位转速;

Q'_1 ——单位流量。

7. 汽蚀系数、汽蚀余量和允许吸上真空高度

水轮机的装置汽蚀系数 σ_p 是一个无因次量, 通常用下式计算:

$$\sigma_p = \frac{H_a - H_s - H_b}{H} \quad (1-12)$$

式中 H_a ——下游水面的大气压力水头 (米水柱);

H_s ——吸出高度 (米水柱);

H_b ——汽化压力水头 (米水柱)。

水泵的汽蚀余量 $\Delta h(NPSH)^*$ 是为了使水泵在运行中不发生汽蚀时所必须储备的能量, 它表示泵进口处单位重量液体所具有的能量比汽化压力下液体具有的能量大多少。可以用下式计算:

$$\Delta h = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_b}{\gamma} \text{ (米水柱)} \quad (1-13)$$

式中 P_1 ——水泵进口压力;

v_1 ——水泵进口处的平均流速;

p_b ——汽化压力。

泵的吸上真空高度 H_s 是指泵不发生汽蚀时泵进口处允许的最低压力, 它可用下式计算。

$$H_s = H_g + h_{\text{吸}} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1-14)$$

式中 H_g ——几何安置高度;

$h_{\text{吸}}$ ——吸水管路的水力损失。

* $NPSH$ 是英文 Net Positive Suction Head 的缩写, 直译为净正吸入水头, 我国习惯称为“汽蚀余量”。

二、水力机械的特性曲线

(一) 叶片泵的特性曲线

泵的特性曲线(又称性能曲线)是指在一定的转速下扬程、功率、效率及汽蚀余量与流量的关系曲线。把这些曲线以一定的比例绘在以流量为横座标以扬程、功率、效率、汽蚀余量为纵座标的图上,所得到的就是水泵特性曲线如图 1-1 所示。这些曲线只能用试验的方法求得。

对于轴流泵,把各种不同叶片安放角的特性曲线画在一张图上,并将等效率曲线及等功率曲线也画在同一图上,称为轴流泵的通用特性曲线如图 1-2 所示。

(二) 水轮机的特性曲线

为了便于进行水轮机模型与原型参数的换算,由模型水轮机试验所得到的数据都要换算成水头和直径为一米时的“单位参数”——单位转速 n'_1 、单位流量 Q'_1 (详见§2-1),并以 n'_1 、 Q'_1 为纵、横座标轴绘制反映水轮机基本特性的综合特性曲线。

1. 混流式和轴流定桨式水轮机的综合特性曲线(绘制方法类似)。

图 1-3 是混流式水轮机综合特性曲线的示意图。在图中,以 Q'_1 为横座标以 n'_1 为纵座标,画出一系列等开度 α_0 曲线,等效率 η 曲线、功率限制线(带阴影的曲线)和等汽蚀系数线(虚线)。

2. 轴流转桨式水轮机的综合特性曲线

轴流转桨式水轮机采用双重调节,以保持导叶开度 α_0 和转轮叶片安放角 φ 的最优协联关系。图1-4是轴流转桨式水轮机的综合特性曲线示意图。除有以上类似的曲线外还绘有等 φ 角线。

3. 水轮机的飞逸特性曲线

在水轮机运行中,当甩全负荷时,调速器或导水机构发生故障使得导叶不能关闭,这时水流的能量全部用于转速的上升而使转速达到极限值。这个空转的最高转速就是飞逸转速 n_f 。这个工况的流量就是飞逸流量 Q'_f 。

图1 5是混流式水轮机飞逸特性曲线的图例,横座标是模型水轮机的导叶开度 α_0 ,纵座标是单位飞逸转速 n'_{f1} 和单位飞逸流量 Q'_{f1} 。

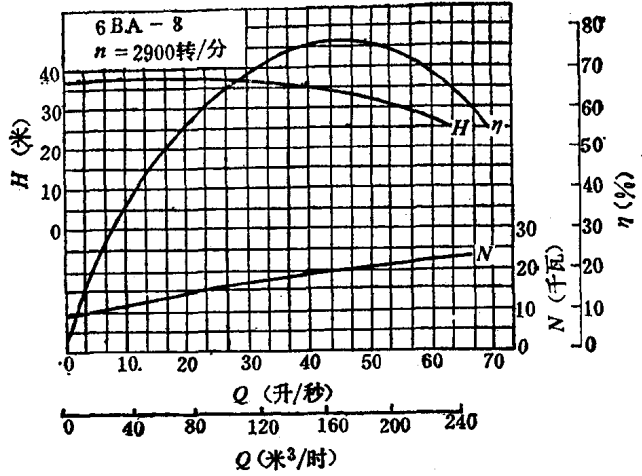


图1-1 6BA-8型离心泵的特性曲线

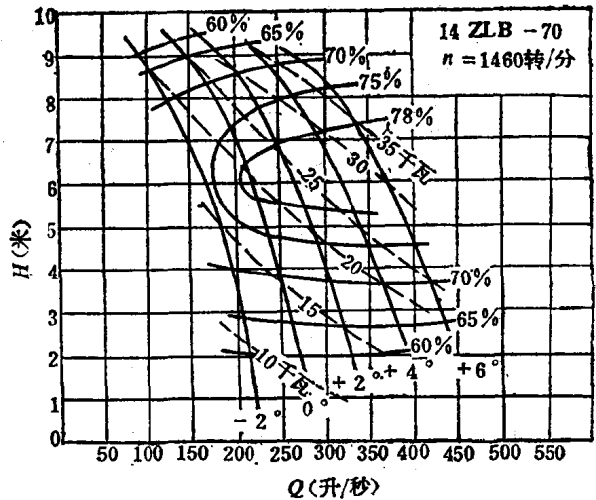


图1-2 14ZLB-70 型轴流泵的通用特性曲线

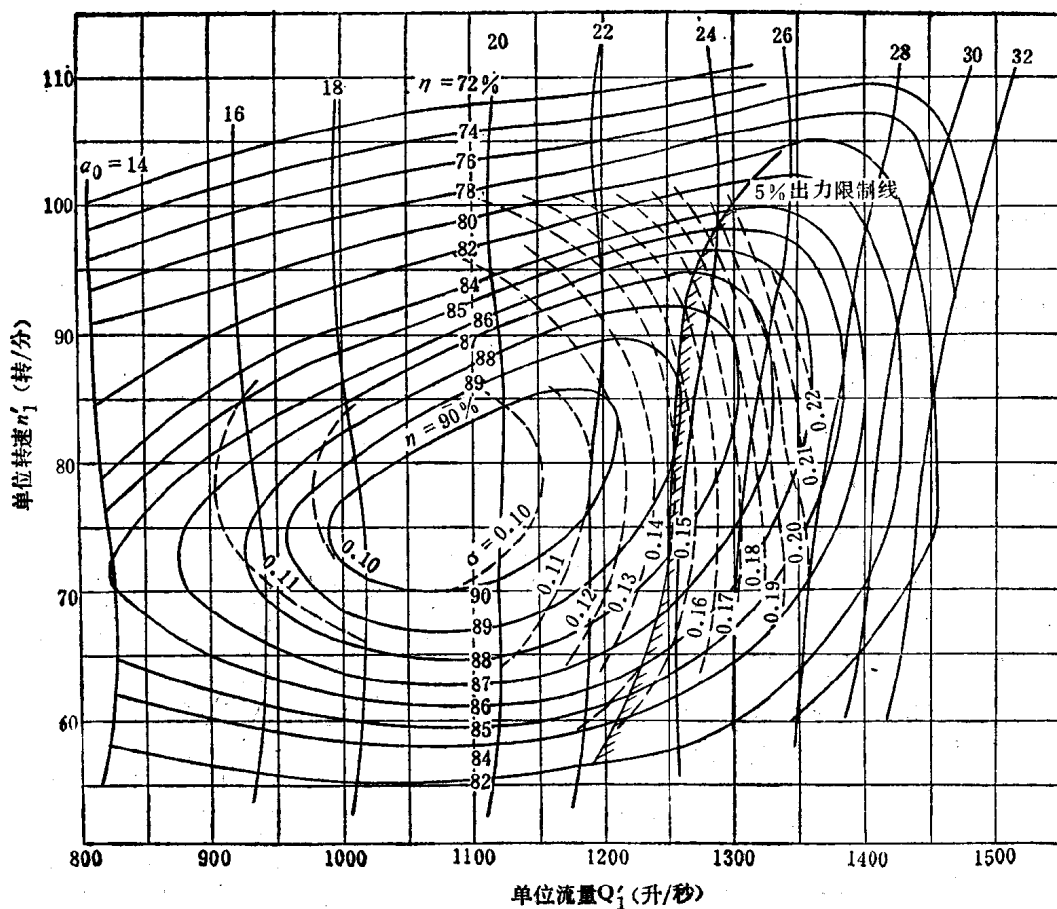


图1-3 混流式转轮模型综合特性曲线

试验条件: $D_{1n}=350$ 毫米 $b_0/D_1=0.315$ 涡壳包角为 345° 尾水管相对高度 $h/D_1=2.6$

使用水头: $H \sim 65$ 米 比转速 $n_s=250$

$$n'_{1f} = \frac{n_f D_1}{\sqrt{H}} \quad (1-15)$$

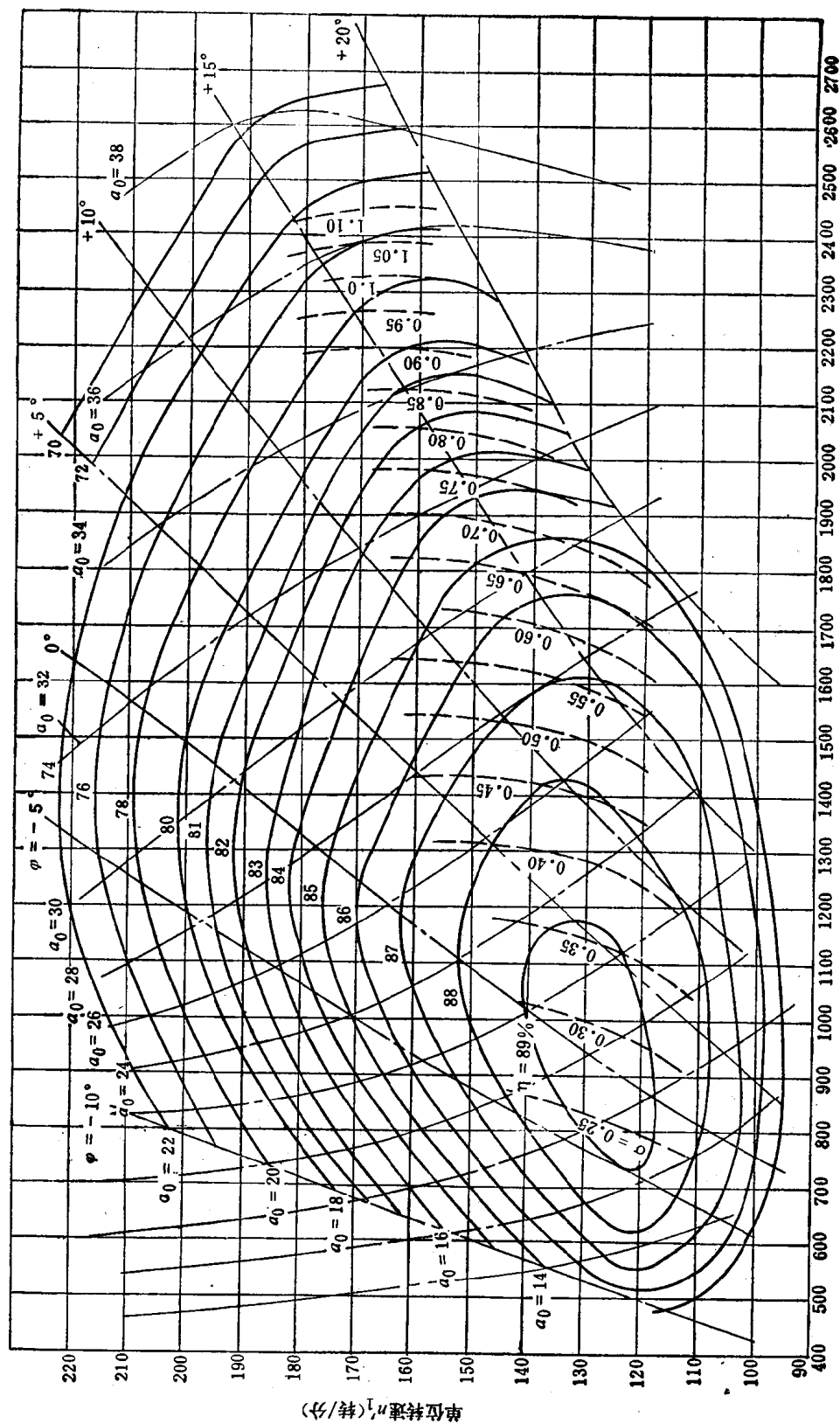
$$Q'_{1f} = \frac{Q_f}{D_1^2 \sqrt{H}} \quad (1-16)$$

转桨式水轮机飞逸特性有两种情况: 第一种情况, 当协联关系破坏时各 φ 角下的 $n'_{1f} = f(a_0)$ 曲线, 该曲线与混流式水轮机类似, 但它为一组曲线。第二种情况, 当调速器失灵但仍保持协联关系的飞逸特性试验, 要对不同的 $n'_1 = \text{常数}$, 选若干 a_0 与 φ 相适应的联合工况点进行试验, 绘出的 $n'_{1f} = f(a_0, \varphi)$ 曲线, 如图 1-6 所示。

(三) 水泵水轮机(可逆式水力机械)的特性曲线

1. 混流式水泵水轮机的水头、扬程与流量、效率、功率的关系曲线

若把各种水头或扬程下的水轮机和水泵的运行特性, 如最高效率、最大流量、出力或输入功率用曲线表示, 则得到如图1-7的特性曲线。图中示出了各种情况下最高效率的运行特性, 还分别绘有水轮机工况下不同水头时最高效率、最大出力的导叶开度, 以及水泵工况下不同扬程时最高效率的导叶开度。



单位流量 Q_1 (升/秒)

图1-4 5叶片轴流转桨式转轮模型综合特性曲线

试验条件: $D_1 = 480$ 毫米 $z_1 = 5$ $d_s/D_1 = 0.44$ $b_s/D_1 = 0.4$ 涡壳包角 180° 尾水管相对高度 $h/D_1 = 2.4$
 使用水头: ~ 30 米比转速 $n_s = 500$

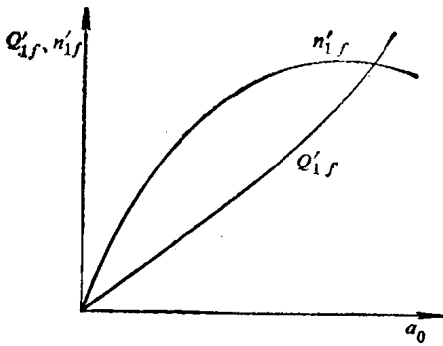


图1-5 混流式水轮机飞逸特性曲线

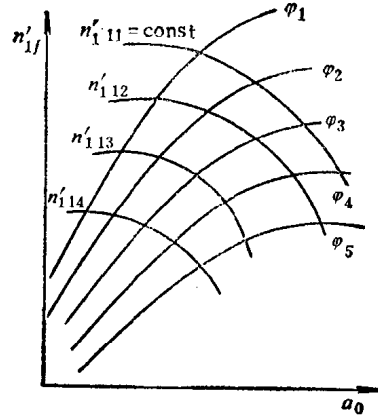


图1-6 轴流转桨式水轮机飞逸特性曲线

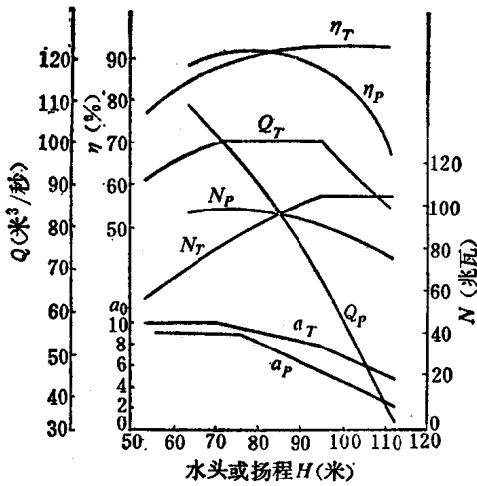


图1-7 混流式水泵水轮机的水头、扬程与流量、效率、功率的关系曲线

水泵工况: η_P , Q_P , N_P , a_P ;
水轮机工况: η_T , Q_T , N_T , a_T

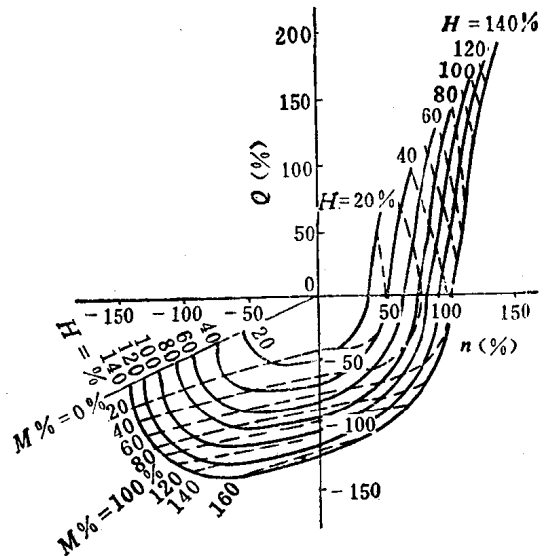


图1-8 水泵水轮机全工况特性曲线

额定转速100% $n=180$ 转/分;设计流量100% $Q=59$ 米³/秒;设计扬程100% $H=115$ 米;导叶开度64%;额定转矩100% $M=380$ 吨·米

2. 水泵水轮机的全工况特性曲线

水泵水轮机运行时,在水轮机或水泵起动、停机、甩负荷等过程中,水压、流速、转速等会产生复杂的变化,可能引起水力振动、机械振动或使各部件的应力变化。为了研究与分析这些过渡过程现象,必须预先由模型试验得出全工况特性。全工况特性是在扬程(水头)、开度为一定的情况下,改变转速测出流量和转矩而得到的。

水泵水轮机的全工况特性有下列过程:

水泵区域

正转正流→正转倒流→反转倒流。

全工况特性曲线的形状随机组的型式、性能而异,即使是同一台模型,因出口阀(或导叶)开度的不同,全工况特性曲线的变化规律也不同。