

抽水蓄能电站水泵水轮机 模型试验导则

2022-12-30 发布

2023-1-1 实施

中国南方电网储能股份有限公司 发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的主要技术内容是：对新建和更新改造换型的抽水蓄能电站水泵水轮机模型试验验收的组织、内容、方法、评价和报告撰写要求进行规定。

本文件由南方电网储能股份有限公司基建部提出并归口管理。

本文件起草单位：南方电网储能股份有限公司、北京中水科水电科技发展有限公司、西北农林科技大学、哈尔滨电机厂有限公司、东方电机厂有限公司。

本标准主要起草人：王超 杨海霞 雷兴春 徐鹏 张海平 王玉川 刘德民 王焕茂 赵伟 朱雷 曾宗耀 郭彦峰 陈莹 刘明。

本指引为第一次修订发布。

目 录

1	范围	6
2	规范性引用文件	6
3	验收方式和要求	6
3.1	同台对比试验	6
3.2	初步验收试验	7
3.3	第三方验收试验	7
4	验收的组织	7
5	验收的流程	7
6	验收的技术内容和方法	9
6.1	术语和定义	9
6.1.1	一般术语:	9
6.1.2	量值、符号和单位	10
6.2	水力性能保证值	13
6.2.1	设计数据和一致性	13
6.2.2	水力性能保证值的规定	13
6.2.3	主水力性能的保证值	13
6.2.4	附加性能数据	13
6.3	试验执行的要求	13
6.3.1	对试验台和模型的要求	13
6.3.2	模型和原型尺寸、试验台的检查要求	14
6.3.3	水力相似、试验条件、试验程序	15
6.3.3	测量方法	15
6.3.4	试验内容	16
6.3.5	物理特性	16
6.4	主水力性能的测量	17
6.4.1	数据采集和数据处理	17
6.4.2	流量的测量	17
6.4.3	压力的测量	18

6.4.4 轴功率的测量	18
6.4.5 试验结果的计算	18
6.4.6 不确定度的估计	18
6.4.7 与保证值的比较	19
6.5 附加性能试验的测量	19
6.5.1 一般规定	19
6.5.2 脉动量的测量和数据采集	19
6.5.3 压力脉动	20
6.5.4 轴向水推力	20
6.5.5 导叶水力矩	21
6.5.6 指数试验	21
6.6 试验方法	22
6.6.1 主性能试验	22
6.6.2 附加性能试验	23
7 验收试验成果及评价	24
8 其他	25
附录 A（规范性）水泵水轮机断面和公称直径	26
附录 B（规范性）效率换算方法	28
附录 C（资料性）验收试验报告提纲	31
附录 D（资料性）验收试验数据的参考表式	34

引 言

本标准由南方电网调峰调频发电有限公司根据公司发展需要，适应抽水蓄能电站规模建设，实现规范化、标准化管理需求而专门制定。

标准的主要目的是细化分解水泵水轮机模型试验工作，指导抽水蓄能电站建设不同阶段水泵水轮机的优选和验收，包括招标阶段的同台对比试验，模型开发阶段的厂内初步验收试验以及第三方试验台的最终模型验收试验等。

本标准主要依从国际标准 IEC60193、国家标准 GB/T 15613，是南方电网调峰调频发电有限公司进行水泵水轮机水力模型优选，判断水泵水轮机模型主要水力性能数据是否满足招标文件或合同保证值，辅助性能数据是否满足机组安全、稳定运行要求及合同保证值的依据。

本标准的部分事项说明如下。

- 沿用 IEC60193 的术语和参数。
 - 规定试验室选择、测量系统、试验方法、测量参数、试验内容、合格要求等项目的依据。
 - 给出结果的计算方法和保证值的比较方法。
 - 评判本标准范围内的合同保证值是否得到满足。
 - 给出报告的范围、内容、结构。
 - 保证值应为考虑了比尺效应后模型试验结果计算出原型水力性能的保证值。
- 如本标准与其他标准有矛盾，以本标准规定为准。

南方电网抽水蓄能电站水泵水轮机模型试验导则

1 范围

本标准适用于南方电网抽水蓄能电站水泵水轮机按照IEC和GB/T标准进行转轮模型验收时的具体验收内容和程序，用以规范公司内抽水蓄能电站水泵水轮机模型转轮试验工作。

本标准用于在实验室条件下验证模型水泵水轮机的水力性能指标是否达到规定值或预想值。

本标准适用于原型功率不小于10MW或公称直径不小于1.0m的水泵水轮机所对应的模型。

本标准中，术语“水轮机”是指做水轮机方式运行的水泵水轮机，术语“水泵”是指做水泵方式运行的水泵水轮机。

只要水泵水轮机的结构或部件不影响模型的性能或模型与原型间的相互关系，那么本标准不涉及机械的详细结构和件的机械性能。

改造水泵水轮机可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.45 电工术语 水电站水力机械设备

GB/T 15468 水轮机基本技术条件 TS

GB/T 22581 混流式水泵水轮机基本技术条件

NB/T 10135 大中型水轮机基本技术规范

GB/T 15613/IEC 60193:2019 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机—模型验收试验

IEC 62097:2019 径流式和轴流式水力机械 从模型到原型的水力性能换算方法（Hydraulic machines, radial and axial - Methodology for performance transposition from model to prototype）

IEC TS 62882:2020 水力机械 混流式水轮机压力脉动换算（Hydraulic machines - Francis turbine pressure fluctuation transposition）

项目合同文件（模型试验相关）

3 验收方式和要求

模型水泵水轮机的验收主要有招投标阶段的同台对比试验，模型开发阶段的初步试验和厂内验收试验以及第三方试验台的模型验收试验等。当采用单一来源采购时参照同台对比试验执行。

3.1 同台对比试验

3.1.1 在水泵水轮机招标阶段，如招标文件有要求，宜通过同台对比试验对不同厂家所投标的水泵水轮机性能进行复核性测试，验证和比较投标的性能参数。

3.1.2 同台对比试验宜选择中立性或第三方试验台进行试验，对所有投标模型的试验应在同一试验台进行，试验标准、试验内容、试验执行人员宜保持一致。

3.1.3 同台对比试验的试验台、模型和试验条件应满足 6.3.1 条规定要求。

3.1.4 同台对比试验应复核能量、空化、稳态飞逸转速、压力脉动、四象限等投标保证值。力特性、空蚀磨蚀、瞬时最大飞逸转速等以投标保证值为准，不再进行相关模型试验。

3.1.5 同台对比试验结果应用作水泵水轮机评标和确立合同的技术依据。

3.1.6 同台对比试验结果与投标参数不一致时，在满足招标要求的前提下，评标阶段以试验结果为准。

3.2 初步验收试验

3.2.1 初步试验应覆盖招标文件所要求的各项试验项目，试验范围主要取决于后续的使用。

3.2.2 有关方应在试验开始前对初步试验结果的使用达成一致：

a) 试验结果仅供参考，不涉及合同值。这种情况下初步试验仅用于研究模型规定项目一般特征或某些限制。

b) 试验结果将会被正式使用，具有合同价值，在这种情况下这些试验结果将作为正式试验数据的一部分，验收试验将去完善或抽查这些结果，这些数据应在验收试验期间进行确认。

3.2.3 模型开发完成后的厂内验收试验应测量、建立或检查技术规范和大纲规定的所有有关模型的数据，试验结果作为与保证值或其他合同规定值进行比较的基础。

3.2.4 所有结果具有合同价值的试验结果，应归入最终试验报告中。

3.3 第三方验收试验

3.3.1 第三方验收试验应在采用初步验收试验完成过渡过程计算后进行。

3.3.2 买方可选取第三方试验台进行水泵水轮机模型试验验收，第三方验收试验可在厂内验收试验之后进行，也可以初步试验之后直接在第三方试验台进行。

3.3.3 第三方模型验收试验宜复核厂内验收试验的主要水力性能保证值，且以第三方试验的结果作为正式试验数据。若第三方和厂内验收试验结果的一致性在试验误差范围内，力特性等其他性能保证可采用厂内验收试验结果。第三方验收试验的试验内容应按表 2 的要求执行。

3.3.4 初步试验之后直接在第三方试验台进行验收试验时，试验要求与 3.3 所规定的厂内验收试验相同。

4 验收的组织

4.1 模型同台对比试验或性能测试试验、第三方验收试验应由买方根据合同要求组织。初步试验和厂内验收试验可由买方或由买方委托卖方完成，买方负责监督试验过程和结果评价。

4.2 买方根据合同要求和模型验收需要成立验收小组，并可聘请技术专家或第三方机构参与模型验收试验。

4.3 第三方专家或机构参与模型验收试验应得到买方授权并明确职责范围，对试验过程和试验成果负有保密义务。

4.4 第三方专家或机构宜以现场见证的方式全程参与模型验收试验，并以合同要求、规程规范和试验大纲等为依据，在试验的过程、内容和结果等方面开展咨询和评价工作，确保试验成果真实可信。

5 验收的流程

5.1 在模型验收试验规划阶段，买方、卖方及第三方实验室（如有）等试验的参与方应就试验的准备、组织和实施等事宜达成一致意见。

5.2 在组织试验阶段，试验的各参与方应就试验大纲、试验日程、试验参与人员和职责、试验安装准备、仪器设备和试验数据处理、模型尺寸检查等方面内容达成一致。

5.3 试验前应提交以下和试验相关的技术资料：

a) 确定保证值的基础数据，如基准断面、水库上游和下游水位范围、输水系统各部分水力损失等。

b) 被检测的水轮机模型尺寸及相关的设计资料。

c) 初步模型试验报告及数据等，初步试验报告宜通过买方组织的技术审查。

5.4 试验的各参与方应任命各自的试验负责人并明确其责任和权利，试验负责人协调处理试验准备和实施阶段出现的相关问题。试验应由实验室独立完成，卖方可派技代术表参加验收试验并负责解答技术问题。

5.5 在试验前确定模型验收试验大纲及其相关合同保证值，试验大纲应包括以下主要内容：

- a) 试验的目的和范围。
- b) 试验标准。
- c) 模型验收试验台的描述。
- d) 试验日程。
- e) 模型验收试验项目及试验条件。
- f) 模型水轮机组的检查。
- g) 测量仪器标定。
- h) 各项验收试验工况点的选定。
- i) 原型参数换算和保证值修正方法。
- j) 要求完成的验收成果，包括各种特性曲线、数据、图表和通流部件的几何形状及尺寸。

5.6 试验日程应包括各阶段的时间节点或持续时间，包括图纸的提交、模型水轮机的提交、试验设备资料的提交、仪器标定、模型尺寸检查、初步试验、验收（见证）试验和试验报告提交。

5.7 试验方的试验负责人应向买方提供试验台及测试设备的说明，包括标定和测量方法、标定和试验数据的处理、试验结果记录等的详细信息。

5.8 验收试验中用于数据采集的仪器设备应采用原级方法进行标定，包括但不限于主力矩 等标定前应确定标定的范围、方法、重新标定的条件等，标定的结果应得到确认。（会后确定范围）

5.9 实验室应进行预试验以验证试验台不会对水轮机能量和空化性能产生不利的影响，并检查测试设备和数据采集系统是否正常工作。

5.10 验收试验时应应对模型进行尺寸检测，提前商定尺寸检验的方法、范围和尺寸检验的数量，尺寸检查应符合 6.3.2.1 条的规定。

5.11 在最终验收试验之前卖方应进行初步模型试验以检验模型水轮机的能量、空化和水力稳定性等性能，初步试验的结果根据供需双方的约定可做如下处理：

- a) 试验结果仅供参考，不涉及合同值，该结果仅供内部使用。
- b) 试验结果被正式采用并作为合同值，该结果作为正式验收试验的组成部分应在验收试验期间被双方确认。

5.12 验收过程的管理

5.12.1 验收工作流程

组建验收组织机构。

编制审查验收大纲及审查资料清单。

进行验收见证及资料检查，签订验收会议纪要。

编写验收报告，归档、移交文件资料。

5.12.2 验收文件资料

验收组应制定文件资料的整理、归档等程序，指定专人根据工作进度收集、整理相关文件资料。

验收过程中，验收组应形成真实、完整的过程记录，并妥善保存、归档，主要包括：

- a) 试验前应提交以下和试验相关的技术资料；
- b) 模型验收试验大纲及其相关合同保证值；
- c) 试验日程资料。
- d) 试验台及测试设备的说明。
- e) 模型进行尺寸检测记录。
- f) 三方签字的验收记录表单、各类报告。
- g) 验收过程影像资料。
- h) 验收过程中产生的会议纪要及争议问题解决方式的过程资料等。

6 验收的技术内容和方法

6.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

有关水轮机的其他术语和定义按照GB/T 2900.45-2006和 GB/T 10969-2008、IEC中的规定执行。

6.1.1 一般术语：

6.1.1.1

模型验收试验 model acceptance test

由买方见证、为验证水轮机性能是否达到合同保证和有关标准而进行的模型试验。

6.1.1.2

保证值 guarantee

合同中约定的规定性能的数据。

6.1.1.3

模型见证试验 model witness test

有买方（或其代理人）参加的对水泵水轮机模型性能进行观测检验的模型试验。

6.1.1.4

水力性能 hydraulic performance

由于流体动力的作用，水力机械表现出的各种性能。

6.1.1.5

主要水力性能数据 main hydraulic performance data

一组可以描述水力机械水力性能的参数，如：功率、流量和/或比能、效率、稳态飞逸转速和/或流量。

注1：这里必须考虑空化的影响。

6.1.1.6

附加性能数据 additional data

从模型试验得出作为资料的水力性能数据。

注1：由于只能采用近似的相似规则，由此预估对应原型数据精度要低于主要水力性能数据。

6.1.1.7

模型综合特性曲线 model performance hill chart/diagram

在以单位流量和单位转速分别为横坐标和纵坐标的系统内，绘有效率和空化系数、压力脉动等性能参数的等值线，表示模型水泵水轮机特性的曲线图。

6.1.1.8

高压基准断面 high pressure reference section

性能保证所指定的水轮机高压侧断面，下标符号以1表示，见图A.1。

6.1.1.9

高压测量断面 high pressure measuring section

用于测量高压侧水压力的断面，下标符号以1'表示，见图A.1。

6.1.1.10

低压基准断面 low pressure reference section

性能保证所指定的水轮机低压侧断面，下标符号以2表示，见图A.1。

6.1.1.11

低压测量断面 low pressure measuring section

用于测量低压侧水压力的断面，下标符号以2' 表示，见图A. 1。

6.1.1.12

公称直径 refference diameter

D

水泵水轮机 规定部位的直径如图A. 2所示。

在进行原型水泵水轮机的保证值和效率换算时应选择公称直径 D 作为水轮机的特征尺寸。

在确定水泵水轮机的特性曲线时，宜选择公称直径 D 作为水轮机的特征尺寸，经供需双方协商一致也可选择GB/T 15468-2020中的规定的转轮直径 D_1 作为特征尺寸。

注：单位为米（m）。

6.1.1.13

尺寸比 length scale ratio

λ_L

原型和模型特征尺寸的比值，通常是水轮机公称直径的比值。

6.1.1.14

空化基准面 cavaitaiton reference level

Z_c

模型试验时作为基准面用于空化评价的水力机械的某一点的高程，通常为导叶中心线所在水平面。

6.1.2 量值、符号和单位

水泵水轮机模型验收试验中涉及参数的量值、符号和单位的定义见表1。

表 1 参数、符号和单位

条款	术语	定义 /描述	符号	单位
6.1.2.1	额定流量 rated discharge	水轮机在额定水头、额定转速下，输出额定功率时的流量。	Q_r	m³/s
6.1.2.2	比能 specific energy	单位质量水所具有的机械能,是压力比能、速度比能和位置比能之和： $e = e_p + e_k + e_z$	e	J/kg
6.1.2.3	水轮机的水力比能 specific hydraulic energy of the machine	高压侧和低压侧基准断面 1、2 之间比能的差值： $E = \frac{P_{abs1} - P_{abs2}}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + (z_1 - z_2)g$ 式中， $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2) / 2$ 且假设 $g = g_1 = g_2$ 。	E	J/kg
6.1.2.4	毛水头（扬程） gross head	水电站上游水位 HWL 和下游水位 TWL 之间的高程差： $H_g = HWL - TWL$ 。	H_g	m
6.1.2.5	净水头（扬程） net head	1)水轮机高压侧与低压侧基准断面的总水头差，即水轮机做功用的有效水头； 2) 水泵出口与进口测量断面的总水头差： $H = (e_1 - e_2) / g$ 。	H	m
6.1.2.6	额定水头 rated head	水轮机在额定转速下，额定输出功率的最小净水头。	H_r	m

6.1.2.7	水泵零流量（关闭）扬程 Zero discharge (shut-off) head of pump	在额定转速运行时，流量为零时水泵的扬程。	$H_{p,0}$	m
6.1.2.8	吸出高度 suction height	空化基准面和尾水位的高差。 $H_s = z_r - z_2, = z_r - z_2 - \frac{p_{abs2} - p_{amb}}{\rho_2 g}$	H_s	m
6.1.2.9	净正吸入比能 net positive suction specific energy	低压断面 2 的绝对比能减去水轮机基准面处的汽化压力所对应的比能： $NPSE = \frac{p_{abs2} - p_{va}}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} - g(z_r - z_2)$ $= -E_s + \frac{p_{amb} - p_{va}}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2}$	NP SE	J/kg g
6.1.2.10	净正吸入水头 net positive suction head	$NPSH = NPSE / g$ 。	NP SH	m
6.1.2.11	空化系数（托马数） Thoma number	无量纲数，表面水轮机运行时的空化情况， $\sigma = NPSH / H$ 。	σ	-
6.1.2.12	临界空化系数 critical Thoma number	与所规定空化开始状态有关的空化系数，如规定能量下降值。在模型试验中一般规定效率从未发生空化的状态下降 0.5%（或 1.0%）作为临界空化状态，此时空化系数为临界空化系数。	σ_c	-
6.1.2.13	初生空化系数 incipient Thoma number	试验中目测可见到转轮叶片上出现非游移型可见气泡时的最大空化系数，通常以观察到 2~3 个叶片同时出现空泡为判定依据。 水泵水轮机在水泵大流量工况无法用目测法观测可见气泡时，可采用声学法或临近叶片反射法辅助确定初生空化。	σ_i	-
6.1.2.14	电站空化系数 plant Thoma number	原型水轮机在运行条件下的空化系数。	σ_p	-
6.1.2.15	水轮机输入（或水泵输出）功率 hydraulic power	水轮机进口（或水泵出口）水流所具有的水力功率： $P_h = gH(\rho Q)$ 。	Ph	W
6.1.2.16	水轮机输出（或水泵输入）功率 mechanical power of the machine	水轮机主轴输出（或水泵主轴输入）的机械功率，包括了由机械有关轴承和轴密封分担的损失。	P	W
6.1.2.17	水泵零流量（关闭）功率 zero discharge (shut-off) power of the pump	水泵在额定转速下流量为零时的输入功率。	$P_{p,0}$	W
6.1.2.18	轴力矩 shaft torque	作用在水轮机（或水泵）轴上且相应于水轮机输出（或水泵输入）功率的力矩。	T	$N \cdot m$
6.1.2.19	转轮力矩 runner torque	通过转轮（或叶轮）和轴的连接传递且相应于转轮（或叶轮）机械功率的力矩。	Tm	$N \cdot m$

6.1.2.20	摩擦力矩 friction torque	水轮机的导轴承、推力轴承和轴密封中的摩擦力矩。	Tf	$N \cdot m$
6.1.2.21	水力效率 hydraulic efficiency	1) 水轮机转轮机械功率与水轮机输入功率的比值: $\eta_h = P_m / P_h$; 2) 水泵输入功率与叶轮机械功率的比值: $\eta_h = P_h / P_m$ 。	η_h	—
6.1.2.22	最优效率 optimum efficiency	水轮机最优工况下的效率,即最高效率点。	η_{opt}	—
6.1.2.23	加权平均效率 weighted average efficiency	规定运行工况点水轮机效率的加权平均值: $\eta_w = \frac{w_1\eta_1 + w_2\eta_2 + w_3\eta_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots} = \frac{\sum w_i\eta_i}{\sum w_i}$ 。	η_w	—
6.1.2.24	水轮机飞逸转速 runaway speed of turbine	水轮机处于失控状态,轴端负荷力矩为零时水轮机的稳态转速。	n_R	r/m in
6.1.2.25	水轮机单位转速 unit speed of turbine	转轮直径为 1m, 在 1m 净水头下水轮机的转速: $n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}}$ 。	n_{11}	r/m in
6.1.2.26	单位流量 unit discharge of turbine	当转轮直径为 1m、水头为 1m 时的流量: $Q_{11} = \frac{Q}{D^2\sqrt{H}}$	Q_{11}	m ³ / s
6.1.2.27	单位功率 unit power of turbine	转轮直径为 1m, 在 1m 净水头下, 水轮机输出的机械功率: $P_{11} = \frac{P}{D^2\sqrt{H^3}}$ 。	P_{11}	kW
6.1.2.28	水泵流量系数 discharge coefficient of pump	$\varphi = \frac{v_m}{u} = \frac{Q}{\pi/4 \cdot D^2 \cdot u}$	φ	—
6.1.2.29	水泵压力系数 Pressure coefficient of pump	$\psi = \frac{H}{u^2 / (2g)}$	ψ	—
6.1.2.30	水泵功率系数 power coefficient of pump	$\lambda = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho \cdot \frac{1}{4}\pi D^2 \cdot u^3}$	λ	—
6.1.2.31	水轮机比转速 specific speed of turbine	几何相似的水轮机当净水头为 1m, 输出功率为 1kW 时的转速: $n_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}}$	n_s	m·kW
6.1.2.32	水泵比转速 specific speed of pump	水泵比转速是水泵的综合相似性判别数, 其定义为: $n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$	n_s	m ·

6.1.2.33	雷诺数 Reynolds number	质量力和粘性力的比值： $Re = uD/\nu$ ；	Re	—
----------	------------------------	--------------------------------	------	---

6.2 水力性能保证值

6.2.1 设计数据和一致性

6.2.1.1 试验前应向试验台提供基于保证值的专门数据，包括参考断面、水位、比能、比能损失等，也应对决定机组性能的管道、电气和机器部分相互作用的一致性负责。

6.2.1.2 买方应提供下列精确详细的数据：

- a) 水库的上下游水位的运行范围。
- b) 输水系统布置图，损失计算公式及从进口至出口输水管道的每一部分水损失。

6.2.2 水力性能保证值的规定

6.2.2.1 水泵水轮机的合同保证值应至少包括功率，流量和/或比能，效率，最大暂态飞逸转速，最大/最小暂态压力和最大稳态飞逸转速、水泵工况最大比能（扬程）和零流量功率，以及与空化相关的保证。保证值应依据性能曲线在多个运行工况点给出，必要时可以给出保证值表格。

6.2.2.2 采用模型试验的方法来验收原型水泵水轮机的性能时，宜采用下列两种保证格式的一种：

- a) 考虑比尺效应后，根据模型试验结果计算原型机水力性能的保证值。
- b) 考虑雷诺数的模型水力性能的保证值。

6.2.3 主水力性能的保证值

6.2.3.1 主水力性能保证值应包括效率、流量、功率、稳态飞逸转速、空化特性、压力脉动和四象限特性等。

6.2.3.2 主水力性能保证值应满足以下要求：

- a) 功率在一个或多个规定的水头下达到。
 - b) 流量在一个或多个规定的水头下达到。
 - c) 效率在一个或多个规定的水力比能下达到，且满足以下要求之一：
 - 在一个或多个规定的功率或流量条件下。
 - 整个规定的功率或流量范围内加权平均效率。
 - d) 飞逸转速：运行在最大或任何规定的比能下稳态飞逸转速值不超过规定值。
 - e) 空化性能：在一个或多个规定的水力比能、流量或功率下达到，通常取相应的最小电站空化系数。
 - f) 压力脉动：
- 6.2.3.3 四象限特性：

6.2.4 附加性能数据

6.2.4.1 应通过模型试验中获得附加性能数据以用作原型机运行的指导。

6.2.4.2 附加性能数据宜包括水推力（包括轴向和径向）、导叶水力矩、零流量特性及与原型机指数试验有关的差压测量。

6.3 试验执行的要求

6.3.1 对试验台和模型的要求

6.3.1.1 试验台的要求

6.3.1.1.1 试验台应为闭式试验台，满足水泵水轮机试验项目、试验参数、测量精度和稳定性要求。

6.3.1.1.2 试验能力应涵盖水泵水轮机全特性运行范围，验收试验的全部试验项目应在同一试验台进

行。

6.3.1.1.3 试验系统应具有以下稳定试验条件：

- a) 在原型保证运行范围内的工况点应具有可重复的稳定运行条件。
- b) 单位流量、单位转速和单位功率的测量值与规定值之间的允许偏差为 $\pm 0.5\%$ 。
- c) 空化系数的允许偏差为 $\pm 3.0\%$ 。

6.3.1.1.4 试验用水应满足以下条件：

- a) 水温保持在 $8^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 范围内，变化范围小于 $5^{\circ}\text{C}/\text{天}$ 。
- b) 水中溶解氧含量应在 $3.0\times 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^3\sim 6.0\times 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^3$ 范围内。

6.3.1.1.5 试验台精度应满足模型效率试验综合不确定度不超过 $\pm 0.25\%$ ，允许重复性误差为 $\pm 0.15\%$ 。

6.3.1.2 模型的要求

6.3.1.2.1 水泵水轮机的进出口范围和高压基准断面应在合同中明确规定，制造厂应提供模型水轮机的全部通流部件，包括蜗壳、转轮、座环、导叶、底环及尾水管等，各部件应严格按设计图纸加工制造。

6.3.1.2.2 模型转轮低压侧直径（ D_2 ）应大于 0.25m ，且应满足最小试验比能不小于 $100\text{J}/\text{kg}$ 和最小雷诺数不小于 4.0×10^6 的试验要求。

6.3.1.2.3 模型和原型的过流部件应具有几何相似关系，转轮和导叶等部件的表面应满足水力光滑的流道条件。

6.3.1.2.4 尾水管上部与转轮低压侧相接位置应设计透明的锥管或观察窗，以用于观测转轮低压侧初生空化和尾水管涡带等流态，透明区域可用非金属加工，但应保证部件的加工精度和刚度。

6.3.1.3 实验室的选择

6.3.1.3.1 实验室应具有合格的计量检定资质或经过正式鉴定，验收试验应选择第三方或中立性试验台执行试验任务。

6.3.1.3.2 实验室在验收试验过程中使用的测量仪器及其校准设备应溯源至相应的国家基准，仪器设备的检定校准证书应在有效期内。

6.3.2 模型和原型尺寸、试验台的检查要求

6.3.2.1 模型尺寸检查

6.3.2.1.1 尺寸检查应检查水泵水轮机通流部件的几何形状及尺寸，并检重复性部件的一致性，其中转轮尺寸检查可选用采用三坐标测量仪、光学测量仪器或样板等方法，尺寸检查的结果应记录。

6.3.2.1.2 模型尺寸检查的项目应包括以下方面：

- a) 蜗壳、座环、导水机构、尾水管等主要尺寸。
- b) 转轮的进出口直径、进口高度、上冠和下环和转轮体等主要尺寸。
- c) 固定导叶、活动导叶及转轮的叶片数量和最大厚度。
- d) 转轮间隙和导叶间隙。
- e) 转轮迷宫密封间隙宜不小于 0.15mm 。
- f) 过流部件的表面粗糙度。

6.3.2.1.3 尺寸检查应遵守保密规定并保护卖方的知识产权，在模型验收试验阶段卖方可只提供测量结果和理论型线的差异值。

6.3.2.1.4 尺寸检查结果应以安全的方式封存，如密封于信封的纸质文件或采用安全加密算法（如 NIST FIPS 180-4 或者 SHA-3）保存并电子签名的数字文件，原型检查时应依据封存的文件验证原模型尺寸的相似性。

6.3.2.2 试验台检查

6.3.2.2.1 在正式验收试验前，卖方、买方和第三方试验方（如有）的负责人应对试验台、测试设备以及数据采集系统进行检查，确保试验结果不受机械故障、模型或测试设备或其他缺陷的影响。

6.3.2.2.2 对试验台水力试验循环系统的检查至少应包括：

- a) 测量管路无泄露，流量测量断面和模型之间无漏水或充水。

- b) 测压管路无气泡。
- c) 模型进出口断面、流量测量断面等位置的内流面表面质量良好，流道内无扰流。
- d) 增压泵和调压系统（阀门、供水和压缩空气的供给等）运行正常。
- e) 水质和水温稳定。

6.3.2.2.3 对数据采集系统的检查应至少包括：

- a) 确认所使用仪器和/或测量设备。
- b) 在规定条件（零负载）下对仪器进行“零漂检查”。
- c) 在规定条件下通过重复性测量检查数据采集系统。
- d) 通过手工采样计算验证试验数据的采集、传输和处理的正确性。
- e) 测量没有固定或连接到摆动式定子上的轴承和主轴密封的摩擦力矩（自动补偿转轮输出的力矩），以确定是否有必要进行修正。

6.3.3 水力相似、试验条件、试验程序

6.3.3.1 相似性要求

6.3.3.1.1 模型验收试验除了满足几何相似条件外还应满足水力相似条件，即试验规定的相似工况点应具有相同的单位流量、单位转速和空化系数。

6.3.3.1.2 水泵水轮机模型试验的相似性要求应满足：

- a) 当 $Re_M < Re_P$ ，在保证范围内应考虑雷诺数 Re 对原型效率和功率的影响，并对效率和功率值予以修正。
- b) 对于选定的工况点，应在合同规定的电站空化系数 σ_P 条件下进行性能试验以消除空化可能对能量、压力脉动等性能的影响，并通过变空化试验进行校核。
- c) 飞逸试验和四象限试验不考虑 Re 和 Fr 对试验结果的影响。

6.3.3.2 试验条件

6.3.3.2.1 应在考虑试验台和测试仪器的能力、模型装置的尺寸及结构设计、保证和/或规定的运行范围等因素的基础上确定试验条件。在保证范围内，水泵工况性能试验宜在恒定转速下进行，且试验转速应满足最低水力比能 $E \geq 300J/kg$ 和雷诺数 $Re \geq 4.0 \times 10^6$ 要求，在保证范围内，水轮机工况能量特性试验宜在恒定水头下进行，且试验水头应满足最低水力比能 $E \geq 300J/kg$ 和雷诺数 $Re \geq 4.0 \times 10^6$ 要求。此外，试验水头宜满足以下要求：

当额定水头为 200m 及以下时；试验水头不低于 30m。

当额定水头为 200m~400m 及以下时；试验水头不低于 45m。

当额定水头在 400m~500m（含）之间时，试验水头不低于 55m。

当额定水头为 500m 以上时，试验水头不低于 60m。

6.3.3.2.2 模型试验时，对所有工况点，特别是在原型的保证运行范围内，均应达到可重复的稳态运行条件。

6.3.3.2.3 当试验工况通过与合同规定值相对应的无量纲量（单位转速、单位流量和空化系数）来确定，调节试验工况时宜尽可能接近这些规定值。

6.3.3 测量方法

6.3.3.1 与主要性能保证有关的测量

6.3.3.1.1 用于验证主要水力性能保证值的模型测量应具有要求的精度，试验台宜满足 6.3.1.1 条所规定的要求，流量 Q 、水力比能 E 、力矩 T 和转速 n 的测量按第 6.4 节的规定执行。

6.3.3.1.2 从流量、水力比能、主轴力矩、转速等基本值计算功率和效率按以下规定执行：

a) 水力功率 P_h 根据水力机械的水力比能 E 和通过高压基准断面的流量 Q 确定，流量应考虑基准断面和流量测量断面之间泄露和充入的流量，见式（6.1）。

b) 机械功率 P_m 应测量转轮主轴的联接处传递的机械功率，由转轮提供或接受的力矩 T_m 和转速 n 确定，见式（6.2）；

c) 水力效率是水力功率和转轮机械功率的比值，见式（6.3）。

$$P_h = E(\rho Q)_1 = \rho g Q H \quad (6.1)$$

$$P_m = T \omega = \frac{2\pi n T_m}{60} \quad (6.2)$$

$$\text{水轮机: } \eta_M = \frac{P_m}{P_h} = \frac{T \omega}{\rho g Q H} \quad (6.3-1)$$

$$\text{水泵: } \eta_M = \frac{P_h}{P_m} = \frac{\rho g Q H}{T \omega} \quad (6.3-2)$$

式中:

T——模型水泵水轮机转轮的力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$, $T = F \cdot L$ 。

ω ——模型水泵水轮机的旋转角速度, rad , $\omega = \pi n / 30$ 。

n——转速, r/min 。

F——测功机力矩平衡力, N 。

L——测功臂长度, m 。

Q——流量, m^3/s 。

H——试验净水头, m 。

6.3.3.2 除了验证主要水力性能的保证外, 宜通过模型试验确定一些附加性能数据。附加性能数据应测量水力或机械量的稳态和/或脉动成分, 相关参数的测量方法参照第 6.5 节规定执行。

6.3.3.3 在数据采集和处理时, 应对脉动量取进行平均化处理以获得物理量的真实的平均值, 并对脉动信号进行分析确定频率和振幅, 测量系统的要求、获得平均值和脉动值的数据处理方法见第 6.4 节和第 6.5 节的规定。

6.3.4 试验内容

6.3.4.1 验收试验通常包括主性能试验和附加性能试验, 用户提出的其它验收试验的项目由相关各方协商确定。

6.3.4.2 主性能试验应依据比较明确的相似准则进行, 试验结果应考虑空化的影响 (如在电站空化系数下试验) 并具有要求的测量精度, 内容主要包括:

- 水轮机能量特性(包括效率和输出功率特性)。
- 水轮机空化特性。
- 水轮机飞逸转速特性。
- 异常低水头试验。
- 水泵能量特性(包括效率、输入功率、流量、零流量和驼峰特性等)。
- 水泵空化特性。
- 异常低扬程试验。
- 水轮机工况和水泵工况压力脉动特性。
- 水泵水轮机四象限全特性试验 (含“S”特性试验)。
- 水轮机工况蜗壳压差试验 (用于原型水轮机指数试验)。
- 水泵工况进水管压差试验 (用于原型水泵指数试验)。

6.3.4.3 附加性能试验宜依据近似的相似准则进行, 试验结果的精度可低于主性能试验结果, 内容主要包括:

- 水轮机工况和水泵工况的水推力试验。
- 水轮机工况和水泵工况导叶水力矩。

6.3.4.4 同台对比或性能测试试验、初步试验、厂内验收试验和第三方验收试验内容宜按表 2 的要求执行。

6.3.5 物理特性

定义保证水力机械水力性能所需的主要物理特性, 包括重力加速度、水的密度、水的粘度、水的蒸汽压力、干燥空气的密度和环境压力等, 按 GB/T 15613 给出的公式或数值表确定。

表 2 模型试验类型和项目

序号	试验项目		试验类型			
			同台对比	初步试验	厂内验收	第三方验收
1	水力性能试验	水轮机能量特性	√	√	√	√
2		水轮机空化特性	√	√	√	√
3		水轮机飞逸转速特性	√	√	√	√
4		水轮机异常低水头试验	√	√	√	√
5		水泵能量特性	√	√	√	√
6		水泵空化特性	√	√	√	√
7		水泵驼峰特性	√	√	√	√
8		水泵零流量特性	√	√	√	√
9		水泵异常低扬程试验	√	√	√	√
10	附加性能试验	压力脉动特性（水轮机、水泵）	√	√	√	√
11		蜗壳压差试验（水轮机）	-	√	○	○
12		水推力试验（水轮机、水泵）	-	√	○	-
13		导叶水力矩（水轮机、水泵）	-	√	○	-
14		进水管压差试验（水泵）	-	√	○	○
15		四象限全特性试验（含“S”特性）	√	√	√	√

注：“√”代表必做，“○-”代表选做，“-”代表不做。

6.4 主水力性能的测量

6.4.1 数据采集和数据处理

6.4.1.1 数据采集系统应采用并行测量系统，被测参数由计算机直接从每个通道收集数据进行测量。数据采集和数据处理系统的输出应是对被测参数的真实反映。

6.4.1.2 用于测量性能参数的传感器应在稳定的温度环境下工作，它们应该位于不受温度变化影响的地方（如来自阳光直射、加热板、通风道等）。传感器应在其设计的频域内使用。

6.4.1.3 数据处理软件应具有以下功能：

- 数据采集系统的控制。
- 校准系数的计算。
- 将电气值转换为物理量。
- 平均值和其他统计值的计算。
- 数据的计算。
- 评估由于随机误差造成的不确定性。
- 结果的表述。
- 数据存储。

6.4.1.4 验收试验中每个参数的原始数据应在评价完一个测试点后提供，以便进行人工计算和计算机程序验证，基本的性能数据应该在测试期间连续显示。

6.4.2 流量的测量

6.4.2.1 模型验收试验可用于测量流量的方法可采用原级方法或次级方法，水泵水轮机和流量测量装置之间应没有水的损失或增加。

6.4.2.2 原级方法宜采用静态称重法或静态容积法测量，流量测量的不确定度应该优于 0.10%，其中静态质量方按 ISO 4185 的规定执行，静态容积法按 ISO 8316 的规定执行。

6.4.2.3 次级方法宜采用电磁流量计、差压装置、声学流量计等方法测量流量，流量测量的不确定度应该优于 0.15%，在流量范围内检查测量的重复性。流量计应在试验前后进行校准，两次校准之间的

相对偏差应小于试验前规定的允许值（例如 0.10%）。

6.4.3 压力的测量

6.4.3.1 压力测量断面的位置应尽可能与参考断面相同，且尽可能不产生流动干扰。特殊情况下，如果参考断面的速度分布被严重干扰，应该用其他测量断面来代替该断面，并尽量靠近参考断面。

6.4.3.2 压力宜采用压力传感器测量，压力测量的不确定度应优于 0.10%。测压孔应与管壁齐平。

6.4.3.3 水力比能 E （水头 H ）测量方法按 GB/T15613 的规定执行。测量水头的传感器或仪表应采用原级设备或高精度压力校验仪等标准仪器进行原位标定，标准仪器的允许误差为 $\pm 0.025\%$ 。

6.4.4 轴功率的测量

6.4.4.1 模型水轮机的轴功率 P 宜通过测量施加在转轮上的力矩 T_m 和转速确定，功率按式（6.4）确定。

$$P = T \cdot \omega \quad (6.4)$$

6.4.4.2 施加在转轮上的力矩 T_m 宜采用独立测量轴力矩 T 和摩擦力矩 T_f 的方式进行测量， T_m 根据式（6.5）确定。

$$T_m = T \pm T_{Lm} \begin{cases} + \text{水轮机旋转方向} \\ - \text{水泵旋转方向} \end{cases} \quad (6.5)$$

6.4.4.3 力矩宜采用原级方法或扭矩仪（次级方法）进行测量，测功装置应有良好的稳定性和具有较高的灵敏度，测量灵敏度应在 $0.05\text{Nm} \sim 0.5\text{Nm}$ （下限值适用于 $T_{m,\max} < 500\text{N}\cdot\text{m}$ ）的范围内，测量不确定度应优于 0.15%。

6.4.4.4 采用原级法测量力矩时，作用在测功臂上的力采用高精度力传感器测量，测力的传感器用标准砝码进行原位标定，力的测量允许误差（ f_F ）为 $\pm 0.10\%$ 。采用扭矩仪测力矩时，宜采用标准砝码进行原位标定。

6.4.4.5 水泵水轮机模型转速的测量不确定度应优于 0.05%，宜采用以下方法之一进行测量：

- 使用电子计数器和时基对模型轴产生的脉冲进行计数。
- 与模型轴直接驱动的发电机相连的电子频率计。
- 电动高精度转速表，由模型轴直接驱动的稳定永磁体组成。

6.4.5 试验结果的计算

6.4.5.1 模型试验的结果应被转换为可与合同中规定或保证的数据直接比较的量值。根据合同约定，可选择以下两种方法之一进行换算：

- 考虑比尺效应的换算方法，换算的理论依据和参数选取方法可参考 GB/T 15613 的规定。
- 考虑比尺效应和表面粗糙度的换算方法，换算的理论依据和参数选取方法可参考 IEC 62097:2019 的规定。

原型水轮机的效率、流量、水头或扬程和功率的换算方法见附录 B。

6.4.5.2 在某一特定模型上的试验中计算出的水力效率值宜通过换算公式换算至一个参考的恒定雷诺数下，并考虑到雷诺数带来的比尺效应换算至原型雷诺数下。

6.4.5.3 保证范围内功率、流量、效率、稳态飞逸转速的计算按 GB/T 15613 的规定执行。

6.4.6 不确定度的估计

对测量的结果应进行误差分析，并根据系统和测量误差评估不确定度，试验不确定的评估方法可按照 GB/T 15613 的规定执行。

测量综合误差应包括系统误差和随机误差两部分，其中系统误差取决于测量方法及测量仪表的标定结果，随机误差按统计学方法确定，应保证同一工况点有足够多的测量次数（10 次），降低随机误差。

模型效率的系统误差 E_{η_s} 按式（6.6）确定。

模型效率试验的随机允许误差 $E_{\eta r}$ 为 $\pm 0.1\%$ ，且在此范围内取上限值 $\pm 0.1\%$ 。

水轮机效率合成不确定度应根据系统误差和测量随机误差的合成，按照式（6.7）确定。

$$E_{\eta s} = \sqrt{E_Q^2 + E_H^2 + E_T^2 + E_n^2} \quad (6.6)$$

$$E_{\eta} = \sqrt{E_{\eta s}^2 + E_{\eta r}^2} \quad (6.7)$$

式中：

E_Q ——流量测量误差， $E_Q = \Delta Q / Q$ ；

E_H ——水头测量误差， $E_H = \Delta H / H$ ；

E_T ——力矩测量误差， $E_T = \Delta T / T$ ；

E_n ——转速测量误差， $E_n = \Delta n / n$ 。

6.4.7 与保证值的比较

6.4.7.1 将按照 6.4.5 节计算出的试验结果与合同保证值进行比较，与保证值的比较可考虑不确定性带宽和合同规定的限制。

6.4.7.2 当考虑不确定性带宽时，功率、流量、水力比能和效率的保证值比较按以下规定执行：

a) 水力效率保证值在一个或多个指定的功率或流量下给出：在指定的速度和指定的水力比能下，指定功率或流量下的总不确定性带宽的上限应大于保证的单一数值即满足要求。

b) 水力效率保证值以加权或算术平均效率的形式给出：在指定的速度和指定的水力比能下，在指定流量（或功率）下根据总的不确定性带宽的上限计算出的平均效率大于保证的平均效率即满足要求。

c) 水力效率保证值在不同的水头下给出：应在考虑不确定度带对每个规定的水头进行比较。

6.4.7.3 飞逸转速的保证值应满足：换算到运行范围内最高水头下的最大稳态飞逸转速小于合同保证值。

6.4.7.4 空化性能的保证值应满足：通过空化试验确定的临界空化系数 σ_c 及初生空化系数 σ_i 计算初生空化裕量 k_i 和临界空化裕量 k_c ，空化裕量按式（6.8）和式（6.9）确定，并与合同规定值比较。

$$k_i = \sigma_p / \sigma_i \quad (6.8)$$

$$k_c = \sigma_p / \sigma_c \quad (6.9)$$

6.5 附加性能试验的测量

6.5.1 一般规定

6.5.1.1 在水泵水轮机模型验收试验过程中，宜通过模型试验确定 6.3.4.3 规定的附加性能数据：

6.5.1.2 附加性能试验应与主性能试验使用相同的模型装置、试验台以及测量仪器。在任何情况下，应采取措施将由振动、共振、机械变形和漏水等原因引起的干扰效应及试验测试仪器的缺陷的影响降至最低。

6.5.1.3 适用于主性能试验的有关标定、初步试验、验收试验、检查零点读数等程序也适用于附加性能试验。

6.5.1.4 水泵水轮机模型附加性能试验数据测量的总不确定度通常大于主性能测量值的不确定度，测量方法的选择应确保测量不确定度与商定的数值一致。

6.5.2 脉动量的测量和数据采集

6.5.2.1 脉动量的测量可带有均值或只包含脉动成分。为获取脉动量的特性，测量方法应能够以足够高的分辨率记录脉动量，且从传感器至数据存储器的整个测量链应满足信号分析理论的有关准则。

6.5.2.2 信号调理系统应具有去除高频噪声、剔除不相关的信号成分和偏差补偿的功能，信号记录时间应不小于 10s，信号应记录和储存足够长度的数据，并保证使用足够多的分析窗来估计信号的频谱

特性。

6.5.2.3 对采集的脉冲信号应进行时域和频域分析以确定统计特性和频谱成分,其中时域应采用 97% 置信水平分析。频谱分析可确定以下信息:

- a) 时域分析可确定:
 - 平均值;
 - 特征峰峰值、标准偏差、均方根值;
 - 概率密度函数、概率分布。
- b) 频域分析可确定:
 - 频谱成分(频域内)。
 - 幅值谱(自功率谱的平方根)。
 - 自功率谱(有限能量信号的能量谱)。
 - 互功率谱。
 - 传递函数。
 - 相干函数。

6.5.3 压力脉动

6.5.3.1 压力脉动试验应能够确定以下信息:

- a) 在规定运行范围内压力脉动的相对幅值。
- b) 压力脉动的特征,周期性或随机性。
- c) 压力脉动的主频,如果有。

6.5.3.2 压力脉动试验数据采集系统应满足:

- a) 采样频率达到每通道 2kHz 以上,其 A/D 转换器分辨率不少于 16 位。
- b) 安装压力传感器时,应使传感器的膜片与流道平齐。
- c) 测量压力脉动的传感器应具有足够的灵敏度,其有效脉动压力灵敏度应达到 $\pm 0.1\% \rho E$ 。
- d) 压力脉动传感器的频率响应范围应能覆盖被测信号的全部有用频率且不低于 5kHz。
- e) 测量链的最大允许误差应小于所用测量范围的 $\pm 5\%$ 。
- f) 信号处理设备的最大允许误差应小于振幅的 $\pm 1\%$ 且相位误差应小于 $\pm 10^\circ$ 。

6.5.3.3 宜对压力脉动测量系统进行动态标定,并确定输入压力信号和输出电信号之间的传递关系。

6.5.3.4 压力脉动试验范围应涵盖水泵水轮机的运行范围,对于水泵和水轮机工况的工况要求如下:

a) 对于水泵工况,应按导叶开度在关键水力比能对应的工况点以及电站空化系数下进行试验。还应特别关注水泵零流量、异常低扬程等工况的压力脉动特性。

b) 对于水轮机工况,试验点应覆盖各水头下的规定流量范围,并在电站空化系数下进行试验。对于水头变幅较大的电站,可选择电站在最大和最小的水头及其他特征水头进行试验。

6.5.3.5 压力脉动试验数据不得进行滤波,数据分析应包括时域分析和频域分析,其中压力脉动幅值宜采用 97% 置信度的混频双振幅幅值(峰-峰值)与模型水头的比值 $\Delta H/H$ 表示,压力脉动的频率特性宜采用快速傅里叶变换(FFT)方法分析,并至少给出最大的 3 阶主频及相应的分频幅值。

6.5.3.6 模型测量压力脉动测量值可跟据 IEC TS 62882:2020 的规定对原型压力脉动进行评估。

6.5.4 轴向水推力

6.5.4.1 转轮轴向水推力宜通过模型测量并换算至原型水泵水轮机,试验的结果用于部件的机械设计。轴向水推力试验工况应涵盖水轮机的运行范围,特别应包括预期可能出现最大轴向力的工况,还应包括飞逸工况、转桨式水轮机的非协联工况、可能产生高轴向力的瞬变工况和无负荷工况等。

6.5.4.2 轴向水推力宜按以下方法确定:

a) 通过测量静压轴承的油压的轴向压差确定作用在转轮轴上的轴向推力 F_{aM} , 试验前宜标定压力传感器。

b) 通过测量转轮外轮廓的压力并计算确定转轮上冠和下环的水力轴向力 F_{2M} 和 F_{3M} ;

c) 计算转轮的重量 F_{4M} 、浮力 F_{5M} 和轴端处静水轴向力 F_{6M} , 并根据式(6.10)确定转轮的水动力轴向力 F_{1M} 。

$$F_{1M} = -F_{aM} + F_{2M} - F_{3M} + F_{4M} - F_{5M} + F_{6M} \quad (6.10)$$

d) 根据模型和原型的相似情况确定转轮的轴向水推力 F_h :

1) 模型和原型完全相似时, 轴向水推力按式 (6.11) 计算。

2) 模型和原型不完全相似时, 轴向水推力按式 (6.12) 计算。

$$F_{hM} = F_{aM} - F_{4M} - F_{5M} - F_{6M} \quad (6.11)$$

$$F_{hM} = F_{1M} \quad (6.12)$$

e) 采用式 (6.13) 中的轴向水推力系数 k_A 将模型试验结果换算至原型水轮机:

$$k_A = \frac{F_{hM}}{\rho_M g_M H_M D_M^2} \quad (6.13)$$

以上各力的测量和计算公式依据 GB/T 15613 的规定执行。

6.5.5 导叶水力矩

6.5.5.1 导叶水力矩宜通过专门设计水力载荷测量部件进行测量, 测量时应检查测量部件的机械安全性和固有频率的影响, 同时应检查摩擦力或力矩对模型测量的影响。

6.5.5.2 通过采用粘贴式应变测量仪测量导叶轴的扭曲变形来测量导叶水力矩时, 宜采用静载荷方法进行标定传感器, 一般将标准的力臂和质量作用于导叶开启和关闭方向进行标定。

6.5.5.3 测量导叶的数目和位置分别为: 在鼻端导叶影响区测量 2 只导叶, 与之相对的位置测量 2 只导叶。

6.5.5.4 对每一个工况点, 确定导叶水力矩的平均值 T_G , 可用来计算无量纲的导叶力矩因数 $T_{G,ED}$, 导叶力矩因数根据式 (6.14) 确定。

$$T_{G,ED} = \frac{T_G}{\rho D^3 E} \quad (6.14)$$

6.5.6 指数试验

6.5.6.1 宜在模型上采用压差测流试验的方法确定流量和压差之间的指数关系, 通常水轮机宜在蜗壳上设置压差测点, 水泵宜在进水管上设置压差测点, 压差测流试验可与主性能试验同步进行。

6.5.6.2 对压差测量试验数据采用式 (6.15) 的公式进行线性回归分析确定流量系数 k_M 和流量指数 n , 原型流量系数 k_P 由式 (6.16) 确定。

$$\lg(Q_M) = n \cdot \lg(\Delta p_M) + \lg(k_M) \quad (6.15)$$

$$k_P = k_M \cdot \left(\frac{D_P}{D_M}\right)^{(3-2n)} \cdot \left(\frac{n_P}{n_M}\right)^{(1-2n)} \quad (6.16)$$

式中:

n ——流量指数。

Q_M ——模型流量, m^3/s 。

Δp_M ——模型压力差, Pa。

k_M 、 k_P ——模型和原型的流量系数。

n_M 、 n_P ——模型和原型的转速, r/min 。

6.6 试验方法

6.6.1 主性能试验

6.6.1.1 能量特性试验

6.6.1.1.1 水轮机能量特性试验应按以下要求进行：

- 在无空化条件下进行最优效率试验，在最高效率点工况重复采集不少于 10 次数据，以接近平均值的工况为最优工况点，该点效率 η_{hoptm} 用于原型水轮机效率修正。
- 在保证范围内，水轮机性能试验宜在恒定水头下进行，且试验水头应满足 5.1.2.2 所规定的最低水力比能和雷诺数要求。
- 能量特性试验应在电站空化系数 σ_p 条件下进行。
- 效率和功率试验宜选取 40%~110% a_{OR} （额定工况点导叶开度）范围之内。
- 试验过程中应至少选定 2 个导叶开度的 $\eta=f(n_{11})$ 曲线进行重复性验证，其中 1 个导叶开度在最优效率点附近区域，其他需要验证的工况由买方在综合特性曲线上选定。

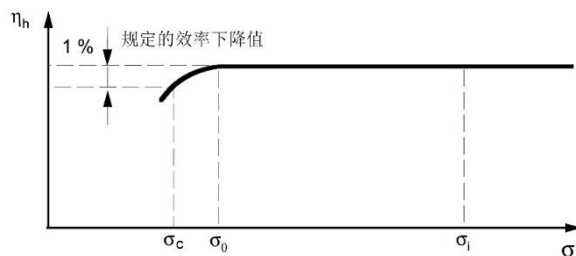
6.6.1.1.2 水泵的能量特性试验应包括驼峰试验、流量特性试验和最大入力试验等试验内容，试验要求如下：

- 在保证范围内，水泵性能试验宜在恒定转速下进行，且试验转速应满足 5.1.2.2 所规定的最低水力比能和雷诺数要求。
- 在完成所有开度的试验后确定水泵的协联运行曲线和最小协联角度，最小协联角度为在最大毛扬程下（频率 $f=50\text{Hz}$ ）的协联导叶角度。
- 最小协联角度下的驼峰试验流量范围应涵盖最小流量值，且应从大流量开始逐渐减小流量，可在最小协联角度附近分别选择大于和小于最小协联角度的两个角度下进行试验来验证最小协联角度的选择。
- 驼峰工况点宜依据 $H-Q$ 特性曲线选取，以流量减小方向扬程曲线上正斜率区的最低点作为驼峰工况点，如果出现多个正斜率区则取最大流量的驼峰工况点，并以流量扬程曲线和最大管路损失曲线的交点为基准扬程，计算驼峰点扬程和基准扬程的差值，确定驼峰裕量（ $f=50\text{Hz}$ ）。
- 流量特性试验宜在最大毛扬程或最小毛扬程（频率 $f=50\text{Hz}$ ）下进行，最小流量为最大毛扬程下同一水道的所有机组满抽时的原型流量，最大流量为最小毛扬程下同一水道的一台机组满抽时的原型流量，平均流量为最大流量和最小流量的均值。
- 最大输入功率试验宜在最小毛扬程下进行，通常为正常电网频率变化范围内且考虑原模型换算偏差的功率最大值。
- 水泵工况零流量试验高空化系数下进行，零流量试验应记录扬程、输入功率和压力脉动等数据。

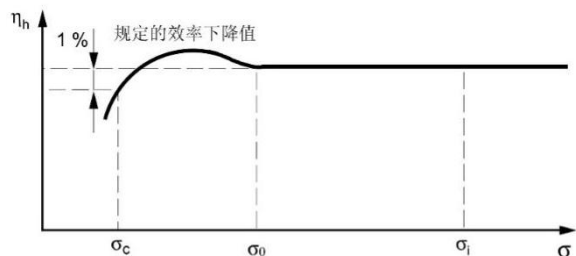
6.6.1.2 空化试验

空化试验应按以下要求进行：

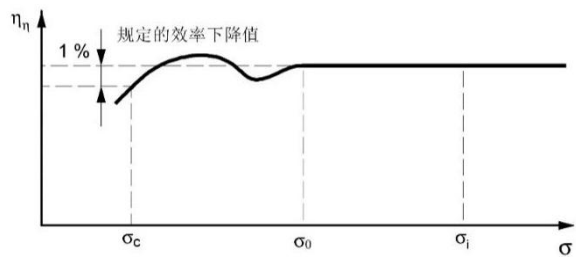
- 空化试验的最低水力比能宜不小于 300 J/kg。
- 在空化试验时应保持工况参数不变，单位水头或单位流量之一应保持恒定。
- 空化特性试验的曲线以横坐标为空化系数 σ ，纵坐标为水轮机效率 η 、单位转速 n_{11} 及单位流量 Q_{11} 绘制出以下三条曲线： $\eta=f(\sigma)$ 、 $n_{11}=f(\sigma)$ 和 $Q_{11}=f(\sigma)$ 。
- 临界空化系数 σ_c 的选取宜以 $\eta=f(\sigma)$ 曲线为依据，并参考 $n_{11}=f(\sigma)$ 和 $Q_{11}=f(\sigma)$ 曲线， σ_c 根据效率曲线的下降值（0.2%~1.0%）确定，具体取值以合同要求为准，不同空化试验曲线的临界空化系数取值方法示例见图 1。
- 初生空化宜使用闪频仪观察转轮低压侧出口的流态确定，初生空化系数 σ_i 宜按按 3 个转轮叶片表面开始出现可见气泡为依据来确定。
- 在在大于最优流量的水泵运行区域，可采用噪声法或抛光相邻叶片利用抛光镜面观察叶片正压面初生空化现象，并确定初生空化系数。
- 在电站空化系数、初生空化系数和临界空化系数等状态下宜采用拍照、摄像或绘图的方法记录空化流动状态。



a) 空化系数第一种取法



b) 空化系数第二种取法



c) 空化系数第三种取法

图 1 临界空化系数取值示意图

6.6.1.3 飞逸试验

飞逸试验应按以下要求进行：

- 为确保模型水轮机不超过限制转速运行，宜降低模型水轮机的试验水头，但最小飞逸转速不应低于性能试验的转速。
- 在设定的开度下，从稳定工况点开始逐步调高水轮机转速至转轮输出的主力矩 $T_M=0$ 时达到稳态飞逸工况，该点的单位转速 n_{11R} 为单位飞逸转速，换算至原型水头和转速下确定飞逸转速 n_R 。
- 导叶开度宜从接近全关至 110% 额定开度范围内间隔 $2\sim 3^\circ$ 测量稳态飞逸转速，绘制飞逸转速和导叶开度、单位流量的关系曲线。

6.6.2 附加性能试验

6.6.2.1 压力脉动试验

6.6.2.1.1 在模型验收试验中宜进行压力脉动试验，以获取特定运行范围内压力脉动的相对幅值、周期或随机性压力脉动特征以及压力脉动主频等信息。

6.6.2.1.2 压力脉动传感器宜安装在图 2 所示的测点位置，测点的描述见表 3。

6.6.2.1.3 特殊工况下如果试验系统对压力脉动试验的结果产生失真性影响，如水力激振频率与系统固有频率接近时诱发系统共振等，应采取降低激振源的强度或改变系统阻尼等措施减小试验系统的影响。

表 3 压力脉动传感器测点

测点序号	测点位置描述	备注
P ₁	蜗壳进口	必做（关键）
P ₂	转轮与导叶之间的无叶区（宜在水轮机工况额定导叶开度下导叶出水边内切圆直径与转轮上冠外径之间的 1/2 处的分布圆上，水流	必做（关键）

	方向的上、下游侧各布置1个测点)	
p_3	尾水管锥管上游侧距转轮出口0.3~1.0倍转轮直径(宜为0.4 D_2)	必做(关键)
p_4	尾水管锥管下游侧距转轮出口0.3~1.0倍转轮直径(宜为0.4 D_2)	必做(关键)
p_5	尾水管锥管与 p_3 、 p_4 水平旋转90°,或尾水管肘管上	可选
p_6	尾水管出口	可选
p_7	顶盖	必做(参考值)
p_8	底环	必做(参考值)
p_9	蜗壳上游压力管道	可选

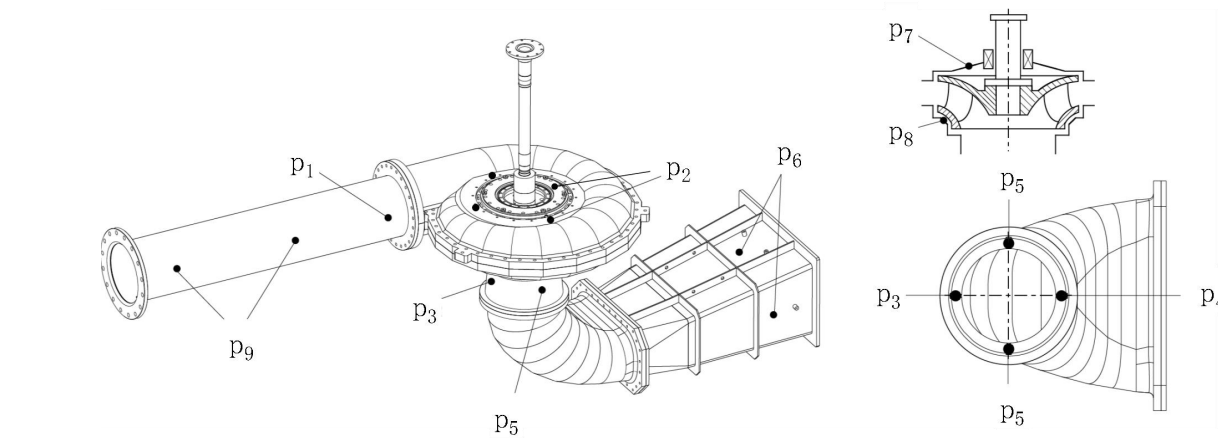


图 2 传感器的安装位置

6.6.2.2 四象限全特性试验

6.6.2.2.1 水泵水轮机应进行四象限全特性试验，试验应涵盖水泵、水泵制动、水轮机、水轮机制动和反水泵等工况四个象限的完整运行模态，对从水轮机工况飞逸点经过制动工况至反水泵工况范围的工况的“S”特性区进行专门试验，并依据最低水头确定“S”特性区的裕度。

6.6.2.2.2 宜选择 2~4 个开度复核初步试验报告中试验结果，所选开度应包括最小、空载和额定开度。

7 验收试验成果及评价

7.1 正式验收（见证）试验应测量、验证和检查技术规范或大纲所规定的全部模型数据，这些数据作为与保证值或合同规定值进行比较的依据，所有结果应作为合同性质的值存入最终试验报告。

7.2 必要的附加性能试验应由供需双方协商确定，试验结果作为初步和验收试验结果的补充存入最终试验报告。

7.3 模型验收试验的数据应得到各方的认同，试验中产生的测量数据、标定结果以及其他必要的文件资料应由模型验收试验各方授权代表签字，验收会议纪要及验收结论等重要的文件记录应由各方负责人签字，签字的试验数据和文件各方保存完整一份。

7.4 模型验收试验报告宜包括以下内容：

- a) 有关模型验收试验的各项记事、文件及资料。
- b) 验收试验项目。
- c) 参加验收试验人员名单。
- d) 试验台及模型水泵水轮机的说明。
- e) 试验过程及测量仪器标定方法的介绍。
- f) 不少于一个详细的算例。
- g) 测量仪表的标定结果，各种试验参数测量误差的分析。
- h) 试验数据的记录。

i) 试验成果及其评价。

j) 经各方签字的验收试验结论。

7.5 模型验收试验结果报交参考格式宜参照附录 D 的规定执行。

7.6 四象限特性试验结果应满足过渡过程计算的各项保证值要求。

8 其他

8.1 公差带认定、滤波、采样频率等问题的处理方法应在试验前由验收组商定，买方、卖方和试验方应达成一致。

8.2 试验结果的问题宜首先由试验验收组依据 IEC、国标规定给出结论或解决方案。

8.3 如若验收组无法达成一致的明确结论，由买方另行组织专题会议讨论决定解决方案或结论。

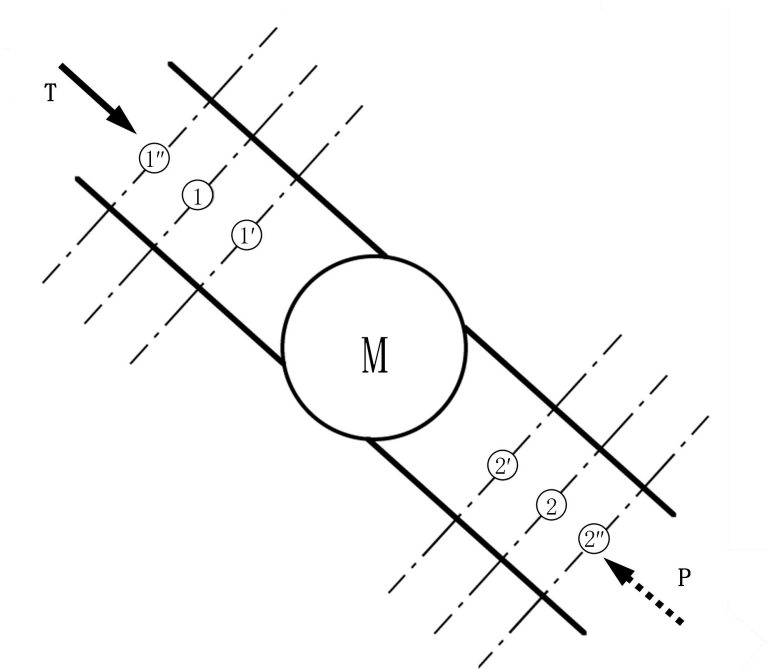
附录 A

(规范性)

水泵水轮机断面和公称直径

A.1 基准断面

水泵水轮机高压参考断面、低压参考断面（断面1和断面2）以及相应的压力测量断面（断面1'和2'）见图A. 1。高低压侧测量断面应尽可能与相应的基准断面一致，否则其测量值应换算到基准断面。



符号说明：

M——水轮机（含水泵水轮机）

T/P——水轮机/水泵流动方向

1——高压参考断面

1' ——高压测量断面

1'' ——进口断面

2——低压参考断面

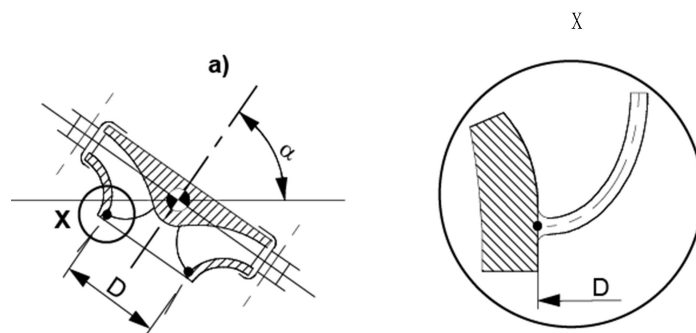
2' ——低压测量断面

2'' ——出口断面

图 A.1 水轮机基准和测量断面

A.2 公称直径

水泵水轮机的公称直径见图 A. 2。



$$0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$$

符号说明:

X—X 局部放大

图 A.2 公称直径

附录 B

(规范性)

效率换算方法

B.1 考虑比尺效应的换算方法

B.1.1 采用考虑比尺效应的换算方法进行水泵水轮机性能换算的步骤如下：

a) 通过最优效率试验确定最优效率 η_{hoptM} 和最优工况雷诺数 Re_{optM} ，试验在无空化条件下进行。

b) 将试验雷诺数 Re_M 条件下的水力效率 η_{hM} 换算到定值雷诺数 Re_{M^*} 条件下，效率修正值为 $(\Delta\eta_h)_{M \rightarrow M^*}$ ：

——如果试验是在雷诺数为定值 Re_{M^*} 的条件下进行则无需进行换算，如果合同要求规定雷诺数 Re_{Msp} 下的保证值，宜取 $\text{Re}_{M^*} = \text{Re}_{\text{Msp}}$ 。

——如果试验是在不同的雷诺数 Re_M 的条件下进行则应换算到规定的 Re_{M^*} ，如果合同要求规定雷诺数 Re_{Msp} 下的保证值，宜取 $\text{Re}_{M^*} = \text{Re}_{\text{Msp}}$ 。

c) 将定值雷诺数 Re_{M^*} 条件下的水力效率 η_{hM^*} 换算到原型雷诺数 Re_P 条件下，效率修正值为 $(\Delta\eta_h)_{M^* \rightarrow P}$ 。

B.1.2 效率换算

第一步，将模型水力效率换算至定值雷诺数 Re_{M^*} 下，效率修正值为：

$$\Delta\eta_{hM \rightarrow M^*} = \delta_{\text{ref}} \cdot \left[\left(\frac{\text{Re}_{\text{ref}}}{\text{Re}_M} \right)^{0.16} - \left(\frac{\text{Re}_{\text{ref}}}{\text{Re}_{M^*}} \right)^{0.16} \right] \quad (\text{B. 1})$$

$$\delta_{\text{ref}} = \frac{1 - \eta_{\text{hoptM}}}{\left(\frac{\text{Re}_{\text{ref}}}{\text{Re}_{\text{optM}}} \right)^{0.16} + \frac{1 - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}}} \quad (\text{B. 2})$$

$$\eta_{hM^*} = \eta_{hM} + \Delta\eta_{hM \rightarrow M^*} \quad (\text{B. 3})$$

式中：

δ_{ref} ——可换算损失。

Re_{ref} ——参考雷诺数， $= 7.0 \times 10^6$ 。

V_{ref} ——损失分布系数，水轮机工况取 0.7，水泵工况取 0.6。

第二步，将水力效率换算至原型雷诺数 Re_P 下，效率修正值为：

$$\Delta\eta_{hM^* \rightarrow P} = \delta_{\text{ref}} \left[\left(\frac{\text{Re}_{\text{ref}}}{\text{Re}_{M^*}} \right)^{0.16} - \left(\frac{\text{Re}_{\text{ref}}}{\text{Re}_P} \right)^{0.16} \right] \quad (\text{B. 4})$$

$$\eta_{hP} = \eta_{hM^*} + \Delta\eta_{hM^* \rightarrow P} \quad (\text{B. 5})$$

B.1.3 将模型试验结果换算至原型条件下，原型水泵水轮机的水头（扬程） H_P 、流量 Q_P 和功率 P_P 按公式 (B. 6) ~ (B. 8) 换算：

$$H_P = H_M \cdot \left(\frac{g_M}{g_P} \right) \cdot \left(\frac{n_P D_P}{n_M D_M} \right)^2 \quad (\text{B. 6})$$

$$Q_P = Q_M \cdot \frac{n_P D_P^3}{n_M D_M^3} \quad (\text{B. 7})$$

$$\text{水轮机工况：} P_P = P_M \frac{\rho_{1P}}{\rho_{1M}} \left(\frac{H_P g_P}{H_M g_M} \right)^{3/2} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{\eta_{hP}}{\eta_{hM}} \right) \quad (\text{B. 8-1})$$

$$\text{水泵工况: } P_p = P_M \frac{\rho_{1P}}{\rho_{1M}} \left(\frac{H_P g_P}{H_M g_M} \right)^{3/2} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{\eta_{hM}}{\eta_{hP}} \right) \quad (\text{B. 8-2})$$

式中:

g_M 、 g_P ——模型和原型的当地重力加速度, m/s^2 。

n_M 、 n_P ——模型和原型水泵水轮机的转速, r/min 。

D_M 、 D_P ——模型和原型的转轮直径, m 。

ρ_M 、 ρ_P ——模型和原型水密度, kg/m^3 , 取值参考附录 B。

B.2 考虑比尺效应和表面粗糙度换算方法

B.2.1 采用考虑比尺效应和表面粗糙度的换算方法进行水泵水轮机性能换算的步骤如下:

a) 对模型性能进行规范化处理 ($M \rightarrow M^*$), 将试验雷诺数和模型真实粗糙度换算到规定的雷诺数 Re_{M^*} 和规定的粗糙度 Ra_{COM^*} 条件下, 规定值可分别取参考值: $\text{Re}_{M^*} = \text{Re}_{\text{ref}}$, $\text{Ra}_{\text{COM}^*} = \text{Ra}_{\text{COMref}}$ 。

b) 将规范化的水轮机性能换算到原型条件下 ($M^* \rightarrow P$)。

B.2.2 效率换算

效率换算分 2 步进行: 第一步将水力效率从模型换算至参考模型, 第二步将水力效率从参考模型换算至原型, 换算公式分别见式 (B.9) 和式 (B.10)。

$$\frac{\eta_{hM^*}}{\eta_{hM}} = (1 + \Delta_{E_{M \rightarrow M^*}})(1 + \Delta_{Q_{M \rightarrow M^*}})(1 + \Delta_{T_{M \rightarrow M^*}}) \quad (\text{B. 9})$$

$$\frac{\eta_P}{\eta_{hM^*}} = (1 + \Delta_{E_{M^* \rightarrow P}})(1 + \Delta_{Q_{M^* \rightarrow P}})(1 + \Delta_{T_{M^* \rightarrow P}}) \quad (\text{B. 10})$$

式中:

$\Delta_{E_{M \rightarrow M^*}}$ 、 $\Delta_{E_{M^* \rightarrow P}}$ ——比能效率修正值。

$\Delta_{Q_{M \rightarrow M^*}}$ 、 $\Delta_{Q_{M^* \rightarrow P}}$ ——容积效率修正值。

$\Delta_{T_{M \rightarrow M^*}}$ 、 $\Delta_{T_{M^* \rightarrow P}}$ ——功率效率 (圆盘摩擦) 修正值。

以上效率修正值的计算方法请参考 IEC 62097:2019。

B.2.3 将模型试验结果换算至原型条件下, 换算时需要对比能、流量和力矩分别进行修正, 原型水泵水轮机的水头 (扬程) H_P 、流量 Q_P 和功率 (入力) P_P 按公式 (B.11) ~ (B.13) 换算:

a) 水头 (比能) 换算:

$$\frac{E_{M^*}}{E_M} = \left(\frac{n_{M^*}}{n_M} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{M^*}}{D_M} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1 + \Delta_{E_{M \rightarrow M^*}})} \quad (\text{B. 11})$$

$$\frac{E_P}{E_{M^*}} = \left(\frac{n_P}{n_{M^*}} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_P}{D_{M^*}} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1 + \Delta_{E_{M^* \rightarrow P}})} \quad (\text{B. 12})$$

$$H_P = E_P / g_P \quad (\text{B. 13})$$

b) 流量换算:

$$\frac{Q_{M^*}}{Q_M} = \frac{n_{M^*}}{n_M} \cdot \left(\frac{D_{M^*}}{D_M} \right)^3 \cdot \frac{1}{(1 + \Delta_{Q_{M \rightarrow M^*}})} \quad (\text{B. 14})$$

$$\frac{Q_P}{Q_{M^*}} = \frac{n_{M^*}}{n_M} \cdot \left(\frac{D_P}{D_{M^*}} \right)^3 \cdot \frac{1}{(1 + \Delta_{Q_{M^* \rightarrow P}})} \quad (\text{B. 15})$$

c) 力矩换算:

$$\frac{T_{M^*}}{T_M} = \left(\frac{n_{M^*}}{n_M} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{M^*}}{D_M} \right)^5 \cdot (1 + \Delta_{T_{M \rightarrow M^*}}) \quad (\text{B. 16})$$

$$\frac{T_P}{T_{M^*}} = \left(\frac{n_P}{n_{M^*}} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_P}{D_{M^*}} \right)^5 \cdot (1 + \Delta_{T_{M^* \rightarrow P}}) \quad (\text{B. 17})$$

d) 功率换算:

$$P_{mM^*} = \rho_{M^*} \cdot E_{mM^*} \cdot Q_{LM^*} \cdot \eta_{hM^*} \quad (\text{B. 18})$$

$$P_{mP} = \rho_P \cdot E_{mP} \cdot Q_{LP} \cdot \eta_{hP} \quad (\text{B. 19})$$

式 (B. 11) ~ (B. 19) 中:

g_M 、 g_P ——模型和原型的当地重力加速度, m/s^2 。

n_M 、 n_P ——模型和原型水泵水轮机的转速, r/min 。

D_M 、 D_P ——模型和原型的转轮直径, m 。

ρ_M 、 ρ_P ——模型和原型水密度, kg/m^3 。

附录 C

（资料性）

验收试验报告提纲

1 模型试验概述

- 1.1 项目电站概述
- 1.2 电站运行条件
- 1.3 电站水库特性
- 1.4 水头 / 扬程及水头 / 扬程损失
- 1.5 水头损失计算公式
- 1.6 电网频率
- 1.7 电站自然条件
- 1.8 水泵水轮机参数
- 1.9 管路系统特性

2 模型试验台概述

- 2.1 试验台主要参数
- 2.2 试验仪器仪表设备
- 2.3 电机及调速系统
- 2.4 测试系统

3 模型水泵水轮机

- 3.1 模型水泵水轮机概述说明
- 3.2 模型水泵水轮机流道尺寸

4 试验内容及试验结果

4.1 水泵工况能量试验

- 4.1.1 试验条件与雷诺数
- 4.1.2 水泵工况最优效率
- 4.1.3 水泵工况算例及水泵工况误差分析
- 4.1.4 水泵工况加权平均效率
- 4.1.5 水泵工况最大入力特性
- 4.1.6 水泵工况最大、最小流量及平均流量值
- 4.1.7 驼峰特性
- 4.1.8 零流量试验特性
- 4.1.9 异常低扬程试验特性
- 4.1.10 水泵工况协联开度曲线
- 4.1.11 与合同保证值的比较

4.2 水泵工况空化性能试验

4.2.1 试验条件

4.2.2 水泵工况空化性能

4.3 水轮机工况能量试验

4.3.1 试验条件和雷诺数

4.3.2 水轮机工况最优效率

4.3.3 水轮机工况算例及水轮机工况误差分析

4.3.4 水轮机工况效率特性

4.3.5 水轮机工况出力特性

4.3.6 水轮机异常低水头特性

4.3.7 与合同保证值的比较

4.4 水轮机工况空化试验

4.4.1 试验条件

4.4.2 水轮机工况空化性能

4.5 飞逸特性试验

4.6 压力脉动试验

4.6.1 水泵工况压力脉动试验

4.6.1.1 试验条件

4.6.1.2 试验结果

4.6.2 水轮机工况压力脉动试验

4.6.2.1 试验条件

4.6.2.2 试验结果

4.7 四象限特性试验

4.8 力特性试验

4.8.1 轴向水推力试验

4.8.2 导叶水力矩试验

5. 试验结论（试验成果及其评价）

6 测量不确定度分析

6.1 测量随机不确定度分析

6.2 测量系统不确定度分析

6.2.1 流量测量相对不确定度

6.2.2 试验水头测量不确定度

6.2.3 力矩测量不确定度

6.2.4 转速测量不确定度计算

6.3 效率测量的总不确定度

7 附件

- 7.1 试验结果曲线图示
- 7.2 水泵水轮机模型流道单线图
- 7.3 试验前后模型测量数据
- 7.4 仪器仪表标定
 - 7.4.1 电磁流量计
 - 7.4.2 水头传感器
 - 7.4.3 负荷传感器
 - 7.4.4 尾水压力传感器
 - 7.4.5 转速传感器
 - 7.4.6 压力脉动传感器
 - 7.4.7 原级测试设备检定证书
 - 7.4.8 验收人员签到附表
 - 7.4.9 验收纪要

附录 D

(资料性)

验收试验数据的参考表式

水泵水轮机模型验收试验数据宜依据本附录给出的典型表式给出，并经过试验各参与方签字确认。
水泵水轮机验收试验数据参考格式见表 D.1～D.16。

D.1 泵工况最优效率验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况最优效率验收试验

表 D.1 水泵工况最优效率验收试验结果

项目		初步试验结果	验收试验结果	保证值
模型	效率 (%)			
	相应扬程 (m)			
	相应流量 (m ³ /s)			
原型	效率 (%)			
	相应扬程 (m)			
	相应流量 (m ³ /s)			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.2 水泵工况加权因子点效率验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况加权因子点效率验收试验

表 D. 2 水泵工况各加权因子点效率验收试验结果

扬程 (m)							
加权因子							
模型效率 (%)	保证 值						
原型效率 (%)							
原型流量 (m ³ /s)							
原型入力 (MW)							
模型效率 (%)	初步 试验 结果						
原型效率 (%)							
原型流量 (m ³ /s)							
原型入力 (MW)							
活动导叶开度 (°)							
模型效率 (%)	验收 试验 结果						
原型效率 (%)							
原型流量 (m ³ /s)							
原型入力 (MW)							
活动导叶开度 (°)							

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.3 水泵工况加权平均效率验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况加权因子点效率验收试验

表 D. 3 水泵工况加权平均效率验收试验结果

项目	初步试验结果	验收试验结果	保证值
模型水泵加权平均效率 (%)			
原型水泵加权平均效率 (%)			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.4 水泵工况最大入力验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况最大入力验收试验

表 D. 4 水泵工况最大入力验收试验结果

项目	初步试验结果	验收试验结果	保证值
在频率为 50Hz 时，包括误差在内的原型水泵最大入力（MW）			
在电网正常频率变化范围内，包括原模型换算误差在内的原型水泵最大输入功率（MW）			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.5 水泵最高扬程下最小流量与扬程裕度的保证验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵最高扬程下最小流量与扬程裕度的保证验收试验

表 D.5 水泵最高扬程下最小流量与扬程裕度的保证验收试验结果

项目	初步试验结果	验收试验结果	保证值
水泵最高扬程 (m)			
相应流量 (m^3/s)			
最高扬程、正常运行最小频率范围内， 扬程流量曲线对应的点与驼峰区的开始点之间的裕度值			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.6 水泵工况空化特性验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况空化特性验收试验结果

表 D. 6 水泵工况初生及临界空化系数验收试验结果

项目	初步试验结果	验收试验结果	保证值
最高扬程时的初生空化系数			
最低扬程时的初生空化系数			
最高扬程时的临界空化系数			
最低扬程时的临界空化系数			

表 D. 7 水泵工况空化特性验收试验结果

扬程 H_p (m)	流量 Q_p (m^3/s)	电网频率 f_p (Hz)	电站装置空 化系数 σ_p	初步 试验	验收 试验	初步 试验	验收 试验	保 证 值
				初生空化系数 σ_i		临界空化系数 σ_c		

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.7 水泵工况压力脉动特性验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况压力脉动特性验收试验

表 D. 8 水泵工况压力脉动特性验收试验结果

测点位置								
保证值		$\Delta H/H < \underline{\hspace{1cm}} \%$						
扬程 H_p (m)	导叶开度							
	初步试验							
	验收试验							

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.8 水泵工况零流量试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水泵工况零流量试验

表 D.9 水泵工况零流量试验结果

项目	初步试验	验收试验	保证值
活动导叶开度 (°)			
零流量扬程 (m)			
输入功率 (MW)			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.9 水轮机工况最优效率验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水轮机工况最优效率验收试验

表 D. 10 水轮机工况最优效率验收试验结果

项目		初步试验结果	验收试验结果	保证值
模型最优效率 (%)				
原型最优效率 (%)				
模型加权平均效率 (%)				
原型加权平均效率 (%)				
在机组运行范围内	模型最优效率 (%)			
	原型最优效率 (%)			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.10 水轮机工况加权平均效率验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水轮机工况加权平均效率验收试验

表 D. 11 水轮机工况加权平均效率验收试验结果

序号	水头 (m)	模型效率%	原型效率%	水轮机出力 (MW)	加权因子
1.					
2.					
.....					
模型加权平均效率____%，合同保证值____%					
原型加权平均效率____%，合同保证值____%					

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.11 水轮机工况空化特性验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水轮机工况空化特性验收试验

表 D. 12 水轮机工况空化特性验收试验结果

水头 H_P (m)	出力 P_r (%)	电站装置 空化系数 σ_p	初步 试验	验收 试验	初步 试验	验收 试验	保证值
			初生空化系数 σ_i		临界空化系数 σ_c		

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.12 水轮机工况飞逸特性验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水轮机工况飞逸特性验收试验

表 D. 13 水轮机工况飞逸特性验收试验结果

活动导叶开度 (°)	初步试验 (r/min)	验收试验 (r/min)	保证值 (r/min)

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.13 水轮机工况压力脉动特性验收试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水轮机工况压力脉动特性验收试验

表 D. 14 水轮机工况压力脉动特性验收试验结果

测点位置								
保证值		额定负荷工况 $\Delta H/H < \underline{\hspace{1cm}}\%$ 部分负荷工况 $\Delta H/H < \underline{\hspace{1cm}}\%$						
水头 H_p (m)	负荷	0% P_r	50% P_r	60% P_r	70% P_r	80% P_r	90% P_r	100% P_r
	初步							
	验收							
	初步							
	验收							

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.14 “S” 特性试验安全余量试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：“S” 特性试验安全余量试验

表 D.15 “S” 特性试验安全余量试验结果

项目	单位	初步试验	验收试验	合同保证值
稳定区域边界临界负斜率点 n11	(r/min)			
稳定区域水头相对于 Hmin 的裕度	(m)			

买方	专家	设计单位	卖方	试验方

D.15 水推力试验结果

项目名称：

试验日期：

试验项目：水推力试验

表 D. 16 水推力试验结果

项目	初步试验		验收试验		保证值
	水轮机	水泵	水轮机	水泵	
稳定状态下，水轮机和水泵运行方式最大向下水推力					
水泵工况最大向下水推力					
过渡过程状态下，最大向上和最大向下水推力					
各种运行方式和状态下，最大向下轴向力（包含所有旋转部件的重量）					

买方	专家	设计单位	卖方	试验方