

ICS 27.100

K 51

备案号: 26362-2009

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1120 — 2009

水轮机调节系统自动测试及实时 仿真装置技术条件

Specification of autotest and real-time simulation to for
hydraulic turbine governor



2009-07-22 发布

2009-12-01 实施

中华人民共和国国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 工作条件	1
4 系统功能及测试项目	1
5 对自动测试方法的一般规定	3
6 测试系统技术要求	4
7 被控对象实时仿真系统技术要求	6
8 验收	7
附录 A (资料性附录) 水轮机实时仿真系统采用的计算公式、计算方法	8

前 言

本标准是根据国家发展和改革委员会《关于下达 2004 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业[2004] 872 号）的安排，为水轮机调节系统自动测试与实时仿真装置的制造和验收，新编制的电力行业标准；编制时结合了我国在此领域的研制成果及使用中积累的实践经验。

本标准的附录 A 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电站自动化标准化技术委员会归口并解释。

本标准的主要起草单位：中国水利水电科学研究院、武汉长江控制设备研究所、武汉大学、三峡水力发电厂、能达通用电气有限责任公司、国网电力科学研究院。

本标准的主要起草人：孔昭年、吴应文、程远楚、余志强、贾宝良、潘熙和、刘文斌、张建明、田忠禄、曾继伦、李越、王丽娟。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心（北京市白广路二条一号，100761）。

水轮机调节系统自动测试及实时仿真装置技术条件

1 范围

本标准规定了水轮机调节系统自动测试及实时仿真装置（以下简称装置）的基本技术条件。该装置可由水轮机调节系统自动测试系统（以下简称测试系统）和水轮机实时仿真系统（以下简称仿真系统）构成。

本标准适用于水电站混流式和轴流转桨式水轮机调节系统自动测试与实时仿真装置的设计制造。符合本标准规定的水轮机调速系统自动测试及实时仿真装置，可用于水轮机调节系统的出厂验收、现场验收测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 9652.1—2007 水轮机控制系统技术条件
- GB/T 9652.2—2007 水轮机控制系统试验验收规程
- DL/T 496—2001 水轮机电液调节系统及装置调整试验导则
- DL/T 563—2004 水轮机电液调节系统及装置技术规程

3 工作条件

- 3.1 组成调速系统的调速器必须是数字式电液调速器，接力器位移传感器信号为 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ ，也可以是 $0\text{V} \sim 5\text{V}$ 或 $0\text{V} \sim 10\text{V}$ 或 $-5\text{V} \sim 5\text{V}$ ，测速通道应在信号电平（RMS）为 $0.2\text{V} \sim 150\text{V}$ 之间可靠工作。
- 3.2 调速器容量选择正确，调节规律正确，仿真试验前应排除调速系统中可能存在的缺陷。
- 3.3 提供的水轮机、发电机和压力引水系统特性参数和数据正确、齐全。
- 3.4 装置的工作地点海拔高度不超过 2500m 。
- 3.5 装置的工作地点空气温度：
 - a) 不同海拔高度的最高空气温度见表 1。

表 1 不同海拔高度的最高空气温度

海拔高度 m	≤ 1000	1000~1500	1500~2000	2000~2500
最高空气温度 ℃	40	37.5	35	32.5

- b) 最低空气温度 5°C 。

- 3.6 装置的工作地点空气相对湿度：最湿月的月平均最大相对湿度为 90% ，同时该月的月平均温度为 25°C 。

4 系统功能及测试项目

4.1 调节对象实时仿真功能

- 4.1.1 依据提供的水轮机、发电机及引水系统的技术资料，利用本装置的软件模块建立调节对象的数学

模型（水轮机应依据综合特性曲线建模）。

4.1.2 实时仿真系统能输出水轮机蜗壳进口处水压信号和水轮发电机组频率信号。信号的形式和电平应与调速设备相匹配，与水轮机调速器闭环构成调节系统。

4.1.3 实时仿真模型主要特性参数可人为整定和校验。

4.2 试验和检测功能

4.2.1 装置具有对下述两种方式构成的水轮机调节系统进行试验和检测的功能：

4.2.1.1 在制造厂由被控对象（引水系统、水轮机、发电机及负载）实时仿真模型与调速器构成闭环调节系统。

4.2.1.2 在发电厂由实际水轮机、发电机、负载与调速器所构成闭环调节系统。

4.2.2 依据 GB/T 9652.2 和 DL/T 496 装置可进行调节系统试验、检测及其动态过程记录的项目如下：

4.2.2.1 调节系统静态特性试验及转速死区指标、静态特性非线性度和永态转差系数检测。

4.2.2.2 电液随动系统（含转轮叶片接力器电液随动系统）静态特性试验及各类随动系统不准确度检测。

4.2.2.3 电液随动系统动态特性试验。

4.2.2.4 电子调节器调节规律试验和调节参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的校验。

4.2.2.5 水轮发电机组开机过程试验。

4.2.2.6 水轮发电机组停机过程试验。

4.2.2.7 水轮机调节系统空载扰动试验。

4.2.2.8 水轮机调节系统手动工况和自动工况下空载频率摆动值测定。

4.2.2.9 水轮发电机组负荷调整（增、减）试验及水轮发电机组一次调频相关试验。

4.2.2.10 负荷扰动试验。

4.2.2.11 水轮机调速系统甩负荷试验

本项试验是考核调速器动态性能的重要依据：

a) 水轮机调速器接力器不动时间检测试验；

b) 依据 GB/T 9652.1 和 DL/T 563 水轮机调节系统甩 100% 负荷时动态过程记录及调节时间 t_p 和波动次数等动态特性指标检测。

4.2.2.12 调节系统故障模拟试验。通过如下试验观测在各种故障情况下接力器的摆动：

a) 频率信号消失；

b) 接力器位移传感器故障；

c) 电液随动系统故障；

d) 交直流电源切换和交直流电源同时消失；

e) 双机切换试验；

f) 电液转换部件故障及双电液转换部件切换试验；

g) 负荷反馈与设定故障试验；

h) 水头信号故障试验。

4.2.2.13 调节系统手、自动切换试验。

4.2.2.14 自定义的功能试验。

4.2.2.15 作为稳定的频率信号源及记录装置参与水轮机调节系统电磁兼容试验。

4.3 试验数据采集、存储和数据处理功能

4.3.1 装置的前置信号处理器和配套的传感器搭载到计算机平台上，加上配备的实时仿真、测试和分析软件应可实现数字化的数据采集、存储、曲线生成和特性参数的分析功能。

4.3.2 对采集来的数据分析处理、特性指标计算应符合 GB/T 9652.2、DL/T 496 和本标准的相应条款规定。

4.3.3 装置应具有数据通信接口，具备与打印、绘图等输出设备连接，输出图形、数据的功能。

4.4 信号频率检测及频率信号发生器功能

4.4.1 装置应具有信号频率检测的功能，可检测的信号频率范围为 0.5Hz~100Hz，可工作的电压为 0.2V~150V (RMS)，短时可承受 200V。

4.4.2 装置应具有频率信号发生器的功能，信号波形为正弦波或方波，信号频率的范围 0.5Hz~100Hz，频率可人为调整和设定，频率还可按约定的输出方式自动改变。

5 对自动测试方法的一般规定

5.1 调速器静特性及转速死区测试

5.1.1 当接力器行程稳定在 50% 附近，开始试验时，通过升高或降低频率使接力器从 50% 向全关或全开方向运行时的测点不记录。

5.1.2 当接力器行程稳定在 50% 附近，开始试验时，使接力器从 50% 向全关或全开方向运行时的频率值应渐变，不应是突变，频率变化速度（时间）应可设定。

5.1.3 在正式开始试验记录前，接力器应保证全关或全开。

5.1.4 在测试过程中，频率变化应是渐变的，每个测点的频率变化增量，两个相邻测点间的频率变化速度（时间），测量等待时间应可设置。为更好地检验调速器频率测量精度的影响，在静特性试验时，频率值在升或降方向的值可以不重合。为此，对自动静特性测试，频率值在升或降方向的差值应可设定。

5.1.5 静特性试验中记录的频率值，应是测量的实际频率值，不能用信号发生器的设定值作为记录的频率值。

5.1.6 试验完成后，应给出试验记录的数据表和试验结果（转速死区、非线性度和永态转差系数），并应以图形方式绘出静特性曲线。静特性可采用最小二乘法进行拟合。在静特性曲线上应明确地标出试验测点的位置。

5.2 随动系统开环增益测定

5.2.1 向随动系统输入端施加相当于接力器全行程约 10% 的阶跃扰动信号，自动记录在正负阶跃扰动时接力器的动作曲线，并确定计算接力器向开启侧运动和向关闭侧运动时随动系统可用增益。

5.2.2 实际最大使用增益可为能保持随动系统稳定且波动次数不超过 1.5 次的最大开环增益。

5.2.3 计算可用增益下的随动系统开环放大倍数。

5.3 开机过程记录

5.3.1 对开机过程，应记录开机过程中的最大频率值，并记录接力器开始开启至频率开始上升的时间，频率上升达到 40Hz 的时间、超调量、波动次数、调节稳定时间。

5.3.2 超调量、波动次数、调节稳定时间的计算均从频率达到 40Hz 的时刻开始计算。

5.3.3 调节稳定时间计算的终止时间为机组转速摆动值不超过稳态转速 $\pm 0.5\%$ 额定值的时刻，稳态转速定义为机组转速波动峰-峰值连续 30s 不超过 1% 额定转速的平均值。

5.4 停机过程记录

记录停机过程中的机组转速、接力器位移曲线，并可自动统计接力器全关时对应的转速、接力器全关（或机组转速从 100%）到转速下降至某一特征值（可设定，如 30%）的时间、转速从设定值下降到 5% 的时间。

5.5 空载转速摆动试验

连续记录 3min，计算在该时段内机组转速的摆动相对值，并以图形的方式显示记录过程，在该过程图中应给出试验结果，并标明转速最大值、最小值和转速的摆动相对值。

5.6 接力器不动时间测试

5.6.1 接力器不动时间测试建议用 25% 负荷状态下进行。

5.6.2 在试验开始至定子电流消失后 1s 内采样步长应 $\leq 1\text{ms}$ 。

5.6.3 测试系统制造厂家应在说明书中给出其自动计算接力器不动时间的方法和判据。如对采样数据进行了滤波,应给出滤波器的传递函数和参数。

5.7 机组甩负荷过程测试

调节时间计算的终止时间为机组转速摆动值与稳态转速的误差不超过 GB/T 9652.1 规定值的首时刻,稳态转速的定义见 5.3.3。

6 测试系统技术要求

6.1 硬件配置及要求

6.1.1 测试系统由计算机和前置信号处理器构成。

6.1.2 计算机内存在 512MB 及以上, CPU 主频在 2.0GHz 及以上。

6.1.3 各输入输出接口相互应是隔离的,无电路上的连接。前置信号处理器应配置下述输入输出接口:

模拟量输入接口 4 路及以上

模拟量输出接口 4 路及以上

开关量输入接口 4 路及以上

开关量输出接口 4 路及以上

频率信号输入接口 2 路及以上

频率信号输出接口 2 路及以上

6.1.4 模拟量输入通道

模拟量输入通道将与水轮机调速器相连,其精度与适用性应符合如下要求:

a) 分辨率 12bit 及以上。

b) 模拟量输入接口的测量范围应为 0V~5V、0V~10V、-5V~+5V、-10V~+10V、4mA~20mA,以满足不同传感器的需要。模拟量输入接口应提供传感器电源,传感器电源应在 5V~24V 范围内可调或可选为 5V、10V、12V、15V、24V。

6.1.5 发电机定子电流,应直接采样发电机电流互感器的二次侧 [输入信号范围为 0A~5A (RMS)],且采用交流采样,其采样步长应 $\leq 1\text{ms}$ 。

6.1.6 模拟量输入回路对阶跃信号的响应达到 90% 稳定值时的时间应 $\leq 5\text{ms}$ 。

6.1.7 模拟量信号的采样步长应 $\leq 5\text{ms}$,高速采样步长应 $\leq 1\text{ms}$ 。

6.1.8 对模拟量输入通道,应提供零位校验和满度校验的方式和方法,以便在开始试验前根据标准信号消除系统误差。

6.1.9 模拟量输出通道。

模拟量输出通道将与水轮机调速器相连,其精度与适用性应符合如下要求:

a) 分辨率 12bit 及以上。

b) 模拟量输出接口的信号范围应可选为 0V~10V、4mA~20mA。

6.1.10 开关量输入回路应给出接口型式、接口电压和负载电流。开关量输入事件分辨率 $\leq 1\text{ms}$ 。

6.1.11 开关量输出回路应给出接口型式、允许电压和负载电流。开关量输出信号滞后时间 $\leq 10\text{ms}$ 。

6.1.12 对频率信号接口及测量要求如下:

测频范围 0.5Hz~100Hz

45Hz~55Hz 范围内测频分辨率 $\leq 0.002\text{Hz}$

测频信号电压范围 0.2V~150V (RMS)

6.1.13 对频率信号发生回路要求如下:

频率信号范围 0.5Hz~100Hz

45Hz~55Hz 范围内信号分辨率 $\leq 0.002\text{Hz}$

信号波形 方波或正弦波

信号电平	$\geq 5V$ (RMS)
负载能力	$\geq 100mA$

6.1.14 装置的电磁兼容性应满足 GB/T 9652.1 的要求,并用相同的方法检测。至少要进行电快速瞬变试验检验:在电源端口、信号端口耦合快速瞬变脉冲群干扰信号,在供电电源端口,保护接地时,试验电压峰值为 2.0kV;在 I/O(输入/输出)信号、数据和控制端口,试验电压峰值为 1.0kV;施加干扰时,装置的输出应稳定无误。

6.2 软件基本功能及要求

6.2.1 测试系统软件

装置的测试系统软件应按测试功能要求实现模块化结构:

- 系统设置与模拟量输入输出通道率定模块;
- 实时数据采集与存储示波器功能模块;
- 存储数据回放与图形显示模块;
- 输出频率信号调整模块;
- 随动系统特性测试模块;
- 调节器 PID 特性测试模块;
- 调速器静特性测试模块;
- 调速器动态特性测试模块;
- 调速器故障模拟及故障处理过程记录模块;
- 动态特性自动分析模块;
- 试验结果处理与动态特性半自动分析模块;
- 试验报告生成模块;
- 打印设置与图形输出模块;
- 自定义的功能模块。

6.2.2 系统设置与模拟量输入输出通道率定模块

通过友好的人机界面能够:

- 可方便地选择模拟量输入通道的接口测量范围;
- 可对每个模拟量输入通道进行零位校验和满量程率定;
- 输入输出通道(包括频率信号与开关量信号)对应的外部实际物理量名称设定;
- 可设定采样步长;
- 可设定每个输入通道采样信号的滤波方法与滤波器参数。

6.2.3 实时数据采集与存储示波器功能模块

在进行水轮机调速器试验时装置的:

- 实时数据采集功能是指对选定的输入信号以普通示波器的方式将当前采样值显示在计算机屏幕上的图形画面中;
- 存储示波器功能是指对选定的输入信号进行一定时间段(可设定)的采集,并存入指定的数据文件中(文件名可设定);或将当前感兴趣的图形曲线(前一定时间段和后一定时间段)存入到指定的数据文件中(文件名可设定)。

6.2.4 存储数据回放与图形显示模块

通过该模块,能打开存储的数据文件,并将过程曲线显示在计算机屏幕上的图形画面中。对显示的过程曲线可进行放大和缩小,并可借助于光标进行读图和简单的数据处理。

6.2.5 输出频率信号调整模块

通过该模块可对频率输出的频率信号进行调整,频率信号的调整可为阶跃式和渐变式,调整的幅值和变化的速度应可设定。两路频率信号可分开调整或同步调整。

6.2.6 随动系统特性测试模块

随动系统静态和动态特性测试主要有：

- a) 测量记录随动系统的阶跃扰动特性，以确定和记录随动系统的可用增益。
- b) 电液随动系统静态特性试验及随动系统不准确度检测。
- c) 轴流转桨式水轮机轮叶接力器随动系统静态特性试验及随动系统不准确度检测。

6.2.7 调速器 PID 特性测试模块

测量记录调节器的 PID 特性，并可根据调节器输出特性按 GB/T 9652.2 规定的方法计算调节参数 K_p 、 K_i 、 K_d （或 b_1 、 T_d 、 T_n ）。

6.2.8 调速器静特性测试模块

自动进行调速器静特性测试，并绘制静特性曲线，计算转速死区、非线性度及永态转差系数。

6.2.9 调速器动态特性测试模块

调速器动态特性测试包括开机过程记录，停机过程记录，空载频率扰动、空载转速摆动、负荷扰动、接力器不动时间、机组甩负荷过程测试。

6.2.10 调速器故障模拟测试模块

用于对 4.2.2.12 所述的调速系统故障发生前后，对导叶开度、机组转速等量进行连续记录，以判定调速器的故障处理对策是否合理和正确。

6.2.11 动态特性分析模块

动态特性自动分析模块应能对自动测试项目的动态过程图形进行分析，并自动计算和显示相应的动态性能指标。在需要时，还可自动生成相关的试验报告。借助于光标，通过一定的操作，可获取过程曲线的相关性能指标，如波峰数、调节时间、超调量等。

6.2.12 试验结果处理模块

试验结果处理模块应能将记录的动态或静态过程曲线显示在计算机屏幕上的图形画面中。对显示的过程曲线可进行放大和缩小，并可借助于光标进行读图：

- a) 可在操作人员的干预下，将动态特性自动分析模块和试验结果处理与动态特性半自动分析模块生成的相关试验的试验结果嵌入到试验报告的对位位置，生成一个完整的试验报告。
- b) 可设置打印输出的格式，可选择打印单个试验结果和试验波形，可打印完整的试验报告，可对屏幕显示的图形按要求的格式打印输出。
- c) 对所有测试项目，在记录文件和回放的图形文件中，应有：试验项目名称、试验仪器名称及编号、试验人员、试验日期、试验时间、试验工况、试验参数以及试验结果等内容。

6.2.13 自定义功能模块

制造厂家自定义或用户要求的其他功能模块。

7 被控对象实时仿真系统技术要求

7.1 实时仿真主要组成

利用数字实时仿真技术，仿真水电站引水系统水锤现象、水轮机的非线性特性、发电机惯性及负荷特性，系统硬件由计算机、前置信号处理器及传感器组成。在调速器制造厂内和水电厂机组投入运行前，与水轮机调速器闭环后进行试验，以检查调速器的动态特性及水电机组自动操作程序，并能初步整定调速器参数。试验获得的最大转速上升和水锤压力上升值具有一定的参照精度。

7.2 选用的水轮发电机组特性及有关基本技术参数

应根据水轮机综合特性曲线（具有制动工况的信息）建立水轮机数学模型。试验数据准备阶段应能方便地输入、修改、复现、确认水轮机非线性特性、水轮发电机组惯性时间常数 T_J 、水电站引水系统时间常数 T_w 、水击波相时间常数 T_r 、水轮机孤立运行条件下的负荷特性系数 e_g 等原始参数。

7.3 引水系统水锤数学模型

对引水系统的仿真可选用刚性水锤数学模型、近似弹性水锤数学模型或弹性水锤数学模型，使用条件和计算公式参见附录 A.3。

7.4 实时仿真系统计算步长的选取原则

在一个步长内完成实时仿真相关量的采集、非线性差分方程组的求解、计算结果的输出和存储。应尽可能缩小计算步长 ΔT ，可取 $\Delta T \leq 0.01s$ ，对于轴流转浆式机组可适当放大。

7.5 被控对象实时仿真系统主要软件

7.5.1 实时仿真系统的软件主要由参数输入模块、实时仿真模块和仿真试验功能模块构成。

7.5.2 参数输入处理模块

参数输入处理模块应能方便地输入或选择如下参数：

- 水轮机力矩特性、流量特性参数表；
- 引水系统特性参数 T_w 、 T_r 及选择的水击计算模型；
- 水轮机型号、水轮发电机型号、水轮发电机组惯性时间常数 T_a 及负荷特性系数 e_g ；
- 计算步长 ΔT ；
- 仿真初始工况时的水轮机发电机组稳态参数（水头、频率、负荷、开度及流量等）；
- 相应于接力器全关、全开时传感器输出最小、最大读数，并自动率定。

7.5.3 实时仿真模块

为实现实时仿真水轮发电机组需求解非线性微分方程组：

- 水轮机力矩计算；
- 水轮机流量计算；
- 引水系统水锤计算；
- 水轮发电机组转速计算。

7.5.4 仿真试验功能模块

利用被控对象实时仿真系统与实际调速器构成闭环调节系统能完成 4.2.2 所列试验项目。

8 验收

8.1 装置应按规定程序批准的图纸和文件制造，交货前应按本标准和有关标准及订货协议由用户组织验收。验收的程序、技术要求及负责单位应按订货协议执行。

8.2 随产品一起供给用户的技术文件应齐全，主要有：产品原理说明书，软件结构和目录、维护调试说明，产品原理图、安装图，产品出厂检验报告，合格证及装箱清单。应提供本装置重要元（板）件原制造厂的相关技术文件。

附录 A

(资料性附录)

水轮机实时仿真系统采用的计算公式、计算方法

A.1 计算公式

A.1.1 水轮机单位流量表达式

$$Q_{11} = f(a, n_{11}) \quad (\text{A.1})$$

A.1.2 水轮机单位力矩表达式

$$M_{11} = f(a, n_{11}) \quad (\text{A.2})$$

A.1.3 水轮机单位转速计算公式

$$n_{11} = \frac{nD_1}{\sqrt{H}} \quad (\text{A.3})$$

A.1.4 水轮机流量、力矩计算公式

$$Q = Q_{11} D_1^2 \sqrt{H} \quad (\text{A.4})$$

$$M = M_{11} D_1^3 H \quad (\text{A.5})$$

A.1.5 相对参数值计算公式

用角标“o”表征稳态值；“r”表征额定值；“Δ”表征偏差值则有：

$$n = n_o + \Delta n \quad (\text{A.6})$$

$$x_o = n_o / n_r \quad (\text{A.7})$$

$$x = \Delta n / n_r \quad (\text{A.8})$$

$$h_o = H_o / H_r \quad (\text{A.9})$$

$$h = \Delta H / H_r \quad (\text{A.10})$$

$$q_{11} = Q_{11} / Q_{11r} \quad (\text{A.11})$$

$$m_{11} = M_{11} / M_{11r} \quad (\text{A.12})$$

$$y_o = Y_o / Y_{\max} \quad (\text{A.13})$$

$$y = \Delta Y / Y_{\max} \quad (\text{A.14})$$

在线性化假设条件下导叶相对开度 $\alpha = Y / Y_{\max} = a / a_{\max}$ ，由以上相应公式可有水轮机相对单位转速、流量、力矩计算公式：

$$x_{11} = n_{11} / n_{11r} = x_o + x / \sqrt{h_o + h} \quad (\text{A.15})$$

$$q = Q / Q_r = q_{11} \sqrt{h_o + h} \quad (\text{A.16})$$

$$m = M / M_r = m_{11} (h_o + h) = \left[\left(\frac{\eta Q_{11}}{n_{11}} \right) / \left(\frac{\eta_r Q_{11r}}{n_{11r}} \right) \right] (h_o + h) \quad (\text{A.17})$$

A.1.6 差分方程的计算公式（见图 A.1）

$$\frac{Y}{X} = \frac{A + BS}{C + DS} \quad (\text{A.18})$$

式中：

Y——输出信号；

X ——输入信号;
 S ——拉氏算子。

差分后有:

$$Y_2 = \frac{A + \frac{2B}{\Delta T}}{C + \frac{2D}{\Delta T}} X_2 + \frac{A - \frac{2B}{\Delta T}}{C + \frac{2D}{\Delta T}} X_1 - \frac{C - \frac{2D}{\Delta T}}{C + \frac{2D}{\Delta T}} Y_1$$

(A.19)

由 t_1, t_2 时刻的输入信号值 X_1, X_2 及 t_1 时刻的输出信号值 Y_1 可计算出 t_2 时刻的输出信号值 Y_2 。



图 A.1 参数的差分计算

A.2 水轮机力矩、流量特征矩阵的计算公式

A.2.1 水轮机的单位力矩特性及单位流量特性

输入至计算机的水轮机特性原始数据应具有制动工况区的信息，由此特性（图 A.2）可有参数表 A.1，并按规定格式输入计算机。

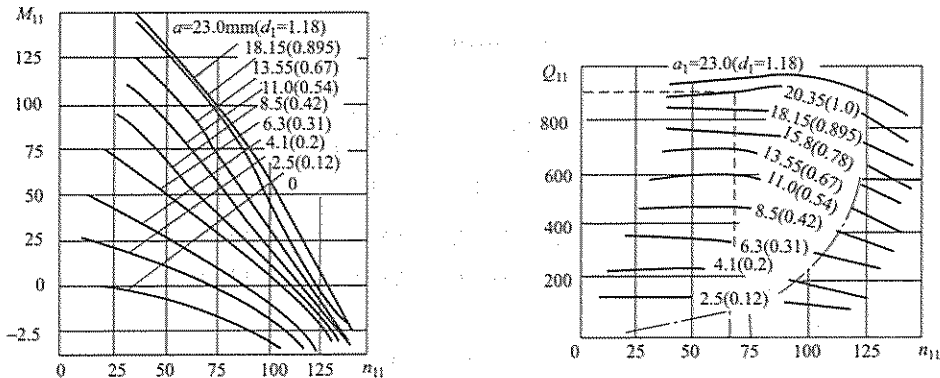


图 A.2 混流式水轮机单位力矩及流量特性示例

表 A.1 水轮机单位力矩及流量表

a	x_{11}					a	x_{11}				
	$(x_{11})_1$	$(x_{11})_2$	...	...	$(x_{11})_n$		$(x_{11})_1$	$(x_{11})_2$	...	...	$(x_{11})_n$
a_1	$(m_{11})_{11}$	$(m_{11})_{12}$	...	...	$(m_{11})_{1n}$	a_1	$(q_{11})_{11}$	$(q_{11})_{12}$	...	...	$(q_{11})_{1n}$
a_2	$(m_{11})_{21}$	$(m_{11})_{22}$	...	...	$(m_{11})_{2n}$	a_2	$(q_{11})_{21}$	$(q_{11})_{22}$	...	...	$(q_{11})_{2n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_n	$(m_{11})_{n1}$	$(m_{11})_{n2}$	...	...	$(m_{11})_{nn}$	a_n	$(q_{11})_{n1}$	$(q_{11})_{n2}$	...	...	$(q_{11})_{nn}$

A.2.2 水轮机流量力矩特征矩阵的推导

可用 $n-1$ 次多项式表征 $a = a_i$ 时的流量:

$$\begin{aligned}
 (q_{11})_1 &= A_1 + A_2 x_{11} + A_3 (x_{11})^2 + \cdots + A_n (x_{11})^{n-1} \\
 &= [A_1, A_2, A_3, \dots, A_n] \begin{Bmatrix} 1 \\ (x_{11}) \\ (x_{11})^2 \\ \vdots \\ (x_{11})^{n-1} \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

显然 A_1, \dots, A_{10} 各参数是导叶开度的函数，相类地用 $n-1$ 次多项式表征，当 $a = a_i$ 时，有：

$$\begin{aligned}
 A_1 &= a_{11} + a_{21} a_i + a_{31} a_i^2 + \cdots + a_{n1} a_i^{n-1} \\
 A_2 &= a_{12} + a_{22} a_i + a_{32} a_i^2 + \cdots + a_{n2} a_i^{n-1} \\
 &\vdots \\
 A_n &= a_{1n} + a_{2n} a_i + a_{3n} a_i^2 + \cdots + a_{nn} a_i^{n-1}
 \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

由式 (A.21) 可以归纳出在表格中各结点上的参数 $(q_{11})_y$ 及 $(m_{11})_y$ ，这些参数构成了求解有关系数的已知条件，并可有矩阵关系式：

$$\{a_y\}_{n \times n} \{(a_q)_y\}_{n \times n} \{(x_{11})_y\}_{n \times n} = \{(q_{11})_y\} \quad (\text{A.22})$$

$$\{a_y\}_{n \times n} \{(a_m)_y\}_{n \times n} \{(x_{11})_y\}_{n \times n} = \{(m_{11})_y\} \quad (\text{A.23})$$

$$\{a_y\} = \begin{bmatrix} 1, a_1, a_1^2, \dots, a_1^{n-1} \\ 1, a_2, a_2^2, \dots, a_2^{n-1} \\ 1, a_3, a_3^2, \dots, a_3^{n-1} \\ \vdots \\ 1, a_n, a_n^2, \dots, a_n^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

$$\{(x_{11})_y\}_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ (x_{11})_1 & (x_{11})_2 & (x_{11})_3 & \cdots & (x_{11})_n \\ (x_{11})_1^2 & (x_{11})_2^2 & (x_{11})_3^2 & \cdots & (x_{11})_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{11})_1^{n-1} & (x_{11})_2^{n-1} & (x_{11})_3^{n-1} & \cdots & (x_{11})_n^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

矩阵 $\{(a_q)_y\}, \{(a_m)_y\}$ 称作水轮机流量和力矩的特性矩阵，矩阵中各元素和分布规律综合表达了不同类型水轮机的流量和力矩对导叶开度和转速变化的敏感程度。水轮机流量、力矩特性矩阵的表达式为：

$$\{(a_q)_y\} = \{a_y\}^{-1} \{(q_{11})_y\} \{(x_{11})_y\}^{-1} \quad (\text{A.26})$$

$$\{(a_m)_y\} = \{a_y\}^{-1} \{(m_{11})_y\} \{(x_{11})_y\}^{-1} \quad (\text{A.27})$$

右端四个矩阵及水轮机流量和力矩的特性矩阵应在仿真数据准备阶段根据有关数据表 A.1 求得，对于轴流转桨式水轮机对应每个定桨特性相类地求取水轮机流量和力矩的特性矩阵；在实时仿真的主程序段，只要已知某一时刻的 x_{11r} 和 a_i 就可很快计算出该时间的单位流量和单位力矩：

$$q_{11r} = (1, a_i, a_i^2, \dots, a_i^{n-1}) \{(a_q)_y\} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{11r} \\ x_{11r}^2 \\ \vdots \\ x_{11r}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

$$m_{11r} = (1, a_r, a_r^2, \dots, a_r^{n-1}) \{ (a_m)_{ij} \} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{11r} \\ x_{11r}^2 \\ \vdots \\ x_{11r}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

A.3 水锤计算公式

A.3.1 刚性水锤

$$G\left(\frac{h}{q}\right) = -T_w S \quad (\text{A.30})$$

使用条件: $T_r/T_r > 6$ 及 $T_w/T_r > 2$ 。

A.3.2 近似弹性水锤

$$G\left(\frac{h}{q}\right) = -\frac{T_w S}{\frac{Tr^2}{\pi^2} S^2 + 1} \quad (\text{A.31})$$

使用条件: $3 < T_r/T_r < 6$, $0.5 < T_w/T_r < 2$ 。

A.3.3 弹性水锤 (A: 压力钢管末端, B: 引水管进口处)

$$\left. \begin{aligned} h_t^A &= -2 \frac{T_w}{T_r} (q_t^A - q_{t-\Delta t}^B) \\ q_t^B &= q_{t-\Delta t}^A - \frac{T_r}{2T_w} h_{t-\Delta t}^A \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.32})$$

使用条件: $T_r/T_r < 3$, $T_w/T_r < 0.5$ 。

1903 年 11 月 1 日

第 1 次

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

第 2 次

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

第 3 次

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

第 4 次

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

1903 年 11 月 1 日

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
水轮机调节系统自动测试及实时
仿真装置技术条件
DL/T 1120—2009

*

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>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷

*

2009年12月第一版 2009年12月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 1印张 24千字
印数 0001—3000册

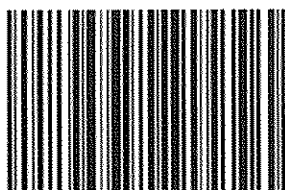
*

统一书号 155083·2245 定价 5.00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



155083.2245

销售分类建议: 规程规范/
水利水电工程/水力发电