

ICS 27.140  
K 55  
备案号: 40075-2013

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1245 — 2013

---

## 水轮机调节系统并网运行技术导则

Technical guide for hydraulic turbine regulating system in grid

2013-03-07 发布

2013-08-01 实施

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 术语和定义 .....	1
4 总则 .....	4
5 技术要求 .....	4
6 试验 .....	9
附录 A (资料性附录) 水轮机调节系统基本技术参数 .....	15
附录 B (资料性附录) 水轮机调节系统一次调频参数 .....	17
附录 C (资料性附录) 常见水轮机及其调节 (控制) 系统数学模型 .....	18
附录 D (资料性附录) 水轮机调节系统对电力系统稳定性的影响 .....	22
参考文献 .....	24

## 前 言

本标准是按照《国家能源局关于下达 2010 年第一批能源领域标准制（修）订计划的通知》（国家能源局国能科技〔2010〕320 号）的安排，根据 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》编制的。

为适应电网容量迅速发展、区域电网互联以及厂网分开的形势，加强机网协调，提高电能质量，本标准规定了水轮机调节系统并网运行的技术要求和试验内容，突出了电网对水轮机调节系统涉网功能的要求与试验方法。本标准与相关的 DL/T 563《水轮机电液调节系统及装置技术规程》、DL/T 496《水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》、DL/T 792《水轮机调节系统及装置运行与检修规程》、DL/T 1120《水轮机调速系统自动测试与被控对象实时仿真装置技术规程》互为补充，互为兼顾。

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。

本标准起草单位：中国水利水电科学研究院、陕西电力科学研究院、长江控制设备研究所、湖南省电力公司科学研究院、国家电力调度通信中心、哈尔滨电机厂有限责任公司、重庆大唐国际彭水水电开发有限公司、国网新源新安江水力发电厂。

本标准主要起草人：张建明、李华、潘熙和、孟佐宏、裴哲义、朴秀日、吴小林、黄业华、万天虎、王建勇、张治宇、李越、刘同安、赵维。

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

# 水轮机调节系统并网运行技术导则

## 1 范围

本标准规定了并入电网（以下简称“并网”）运行的水力发电厂水轮机调节系统的技术性能与功能要求、涉网功能的试验方法。

本标准适用于单机容量 10MW 及以上的并网运行水轮机调节系统，包括数字式、模拟式电液调节系统及装置。其他容量、类型的水轮机调节系统也可以参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 9652.1 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

GB 11120 涡轮机油

DL/T 496 水轮机电液调节系统及装置调整试验导则

DL/T 563 水轮机电液调节系统及装置技术规程

DL/T 792 水轮机调节系统及装置运行与检修规程

DL/T 1040 电网运行准则

DL/T 1120 水轮机调节系统自动测试及实时仿真装置技术条件

JB/T 7041 液压齿轮泵

JB/T 8091 螺杆泵试验方法

JB/T 8097 泵的振动测量与评价方法

JB/T 8191 电工术语 水轮机控制系统

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

**频率〔转速〕<sup>1)</sup>控制 frequency [speed] control**

在孤立电网中或空载运行时，使机组频率〔转速〕与频率〔转速〕指令信号相一致。机组并联运行时，频率〔转速〕通过永态差值系数和控制系统的动态特性来影响电网频率的控制。

### 3.2

**功率控制 power control**

机组并网运行中，调节系统接收功率指令信号，并使功率跟踪于功率指令信号的控制。

### 3.3

**开度控制 opening control**

机组并网运行中，调节系统接收开度指令信号，并使开度跟踪于开度指令信号的控制。

1) 本标准中〔 〕的用法：用方括号中的内容代替其前面的概念可以组成同一或另一词条。

## 3.4

**水位控制 level control**

机组并网运行中，调节系统接收水位指令信号，并使水位跟踪于水位指令信号的控制。

## 3.5

**流量控制 flow control**

机组并网运行中，调节系统接收流量指令信号，并使流量跟踪于流量指令信号的控制。

## 3.6

**浪涌控制 surge control**

在低水头转桨式水轮机中，甩负荷时通过对水轮机导叶和转轮叶片特定的控制，以限制河流里的浪涌。

## 3.7

**比例—积分—微分 [PID] 调速器 proportional-integral-derivative [PID] governor**

能够实现比例—积分—微分调节规律的调速器。

## 3.8

**孤立 [孤岛] [孤网] 运行 isolated operation**

电网中只有一台或本台机组容量占当前电网容量比重相当大的运行方式。

## 3.9

**并联运行 parallel operation**

几台或多台机组同时向电网供电的运行方式。

## 3.10

**空载 [空转] 运行 no-load [idling] operation**

机组未并网，以额定转速运行，当励磁系统投入时，机组处于空载状态；当励磁系统不投入时，机组即处于空转状态。

## 3.11

**带负荷运行 load operation**

机组并网并带负荷，以额定转速及额定电压的运行状态。

## 3.12

**数学模型 mathematical model**

系统的数学描述。常用形式有微分方程、状态方程和传递函数等。

## 3.13

**微分方程 differential equation**

系统在时域内的数学模型。其一般形式为：

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + a_1 y' + a_0 = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \cdots + b_1 x' + b_0$$

式中：

$x$ ——输入量；

$y$ ——输出量；

$m \leq n$ 。

## 3.14

**传递函数 transfer function**

系统在复域内的数学模型。当初始条件为零时，可由上述微分方程经拉普拉斯变换得出。即

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

式中:

$s$ ——拉普拉斯算子。

### 3.15

#### 频率特性 frequency characteristic

系统在频率域内的数学模型。设  $s = j\omega$ ，可由上述传递函数得出:

$$G(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)}$$

据此画出的图形称为系统的频率特性曲线。

### 3.16

#### 阶跃响应 step-response

在阶跃输入信号作用下，系统输出信号随时间变化的过程。

### 3.17

#### 一次调频 primary frequency control (PFC)

一次调频是水轮机调节系统的基本功能，在机组发电运行过程中，当系统频率变化超过调速器的频率/转速死区时，水轮机调节系统将根据频率静态特性（调差特性）所固有的能力，按整定的调差率/永态转差系数自行改变导叶开度（或轮叶转角，或喷针/折向器开度），从而引起机组有功功率的变化，进而影响电网频率的调节过程<sup>2)</sup>。

### 3.18

#### 自动发电控制 automation generator control (AGC)

水电厂自动发电控制是电力系统自动发电控制的一个子系统。通常指的是电网调度中心通过水电厂计算机监控系统作用于水轮机调节系统，从而控制机组开/停机、自动增/减目标有功功率指令，进而改变水电厂或机组的有功功率来满足电力系统的需要。

### 3.19

#### 一次调频合格率 pass rate of primary frequency control

当电网频率偏差超出水轮机调节系统一次调频死区时，一次调频机组的积分电量（ $Q_{SJ}$ ）占相应时间的机组一次调频理论计算积分电量（ $Q_{JS}$ ）的比例作为考评机组一次调频的合格率  $G_{Hi}$ ，即  $G_{Hi} = Q_{SJ} / Q_{JS}$ 。

机组一次调频理论积分电量计算公式为:

$$Q_{JS} = \sum_{t=1}^n \Delta P(\Delta f, t)$$

其中

$$\Delta P(\Delta f, t) = P_n \times \frac{\Delta f(t)}{f_n} \times \frac{1}{e_p}$$

式中:

$\Delta f(t)$ ——频率偏差;

$P_n$ ——机组额定有功功率;

$f_n$ ——额定频率;

$e_p$ ——水轮机调节系统调差率;

$t$ ——积分间隔时间，取 1s;

$n$ ——积分计算时间。

2) 一次调频在开度调节/功率调节模式下体现，其调节过程不受调度及 LCU 控制，调整量随机组不同而不同，其性能的优劣直接影响到供电质量；一次调频达到稳态时，电网频率存在静差，即一次调频属于有差调节。此外，一次调频调节过程与溜负荷、接力器抽动是有区别的。在网厂协调功能中，一次调频功能是稳定电网的有效手段之一。

## 3.20

一次调频投入率 **enabling rate of primary frequency control**

机组一次调频功能投入的时间占机组运行时间的比例作为机组一次调频的投入率，即

$$\text{一次调频投入率} = \frac{\text{机组投入一次调频时间}}{\text{机组运行时间}} \times 100\%$$

## 3.21

一次调频动作正确率 **right response rate of primary frequency control**

机组一次调频的贡献电量是作为判断机组一次调频正确动作的依据，贡献电量为正，则统计为该机组一次调频正确动作 1 次；否则，为不正确动作 1 次。记录机组一次调频正确动作次数和应动作次数，计算机组一次调频动作正确率：

$$\text{一次调频动作正确率} = \frac{\text{一次调频正确动作次数}}{\text{一次调频应动作次数}} \times 100\%$$

## 3.22

黑启动 **black start**

指电力系统大面积停电后，在无外界电源支持的情况下，由具备自启动能力的水轮机组启动并恢复系统的供电。

## 3.23

强迫停运率 **forced outage ratio; F.O.R**

指水轮机调节系统强迫停运小时数对投入小时数与强迫停运小时数之和的比，用百分比表示。水轮机调节系统强迫停运率按下式计算：

$$\text{F.O.R} = \frac{t_f}{t_f + t_s} \times 100\%$$

式中：

$t_f$  ——水轮机调节系统强迫停运的小时数，h；

$t_s$  ——水轮机调节系统投入运行的小时数，h。

## 4 总则

4.1 水轮机调节系统是并网水轮发电机组和电网间协调（以下简称“机网协调”）运行的重要纽带之一。为规范水轮机调节系统并网运行的技术要求、试验方法和设备安全稳定运行，提高机网协调运行水平，特制定本标准。

4.2 本标准提出的要求和条款为水轮机调节系统并网运行的基本要求和一般规定，各区域电网及水力发电企业可根据实际运行状况，制定适合本区域电网及发电企业的技术要求或实施细则。

## 5 技术要求

## 5.1 基本要求

5.1.1 设备的标志齐全、正确清晰，各阀件、开关、器件、组件等完好，设备标识牌编号与图纸完全符合，接线正确。

5.1.2 水轮发电机组运行满足设计要求。

5.1.3 接力器操作功、油压装置工作容积、规定压力损失条件下的主配压阀流量特性等符合设计要求。

5.1.4 水轮机调节系统的整体功能应与水电厂“无人值班”（少人值守）的要求相适应。

5.1.5 水轮机调节系统的技术性能及常规试验应符合 GB/T 9652.1、GB/T 9652.2—2007、DL/T 496、

DL/T 563、DL/T 1120 的要求，同时应满足所并入电网的要求。

5.1.6 外接信号装置或组件、水轮机导水机构、转桨机构、喷针及折向器机构、调速轴及反馈传动机构等应无制造和安装缺陷，并符合各部件的技术要求。

5.1.7 水轮机调节系统频率测量分辨率，对于大型及重要电站的机组应小于 0.003Hz，对于中小型机组应小于 0.005Hz，且测频范围宽（1Hz~100Hz）、测频时间常数小，对被测信号源的适应性好、抗干扰能力强。

5.1.8 接力器关闭与开启时间的整定及其关闭规律符合调节保证计算要求。

5.1.9 水轮机调节系统所用油的质量必须符合 GB 11120 中 46 号汽轮机油或黏度相近的同类型油的规定，使用油温范围为 10℃~50℃。

5.1.10 为保证调速器液压随动系统工作的可靠性，应确保油液的清洁度，过滤精度应符合产品的要求。对油液的污染度通常要求为 NAS1638 的 7~9 级（ISO 的 16/13, 17/14, 18/15 级）。

5.1.11 接力器在机械手动稳定位置时 30min 内位移漂移量，应不大于 1%。<sup>3)</sup>

5.1.12 水轮机调节系统应具有较好的节能效果，在机组静止或稳定状态下，对于间歇运行的油压装置压油泵，其启动间隔不得小于 30min。<sup>3)</sup>

5.1.13 由水轮机调节系统自身故障导致的年强迫停运率，对于大型及重要电站的机组应不大于 0.1%，对于中小型机组应不大于 0.3%。

5.1.14 水轮机调节系统在不同运行工况、不同控制模式下所使用的 PID 调节参数、人工频率/转速死区、永态转差系数/调差率以及随动系统参数、协联关系等均应能通过人机界面或专用调试设备方便查询和调整。

5.1.15 水轮机调节系统手动（包括机械手动、电气手动）、自动状态，频率、开度、功率调节模式，一次调频功能投入、退出，频率跟踪投入、退出，人工水头投入、退出，孤网调节模式投入、退出，协联控制投入、退出，浪涌控制投入、退出，机组空载、并网不同运行工况等应能在运行人机界面上方便查询和调整。

5.1.16 水轮机调节系统根据所在电网的重要性，可配置适当的冗余功能，应保证在冗余系统部分故障时能保证机组的正常运行。

5.1.17 水轮机调节系统应具有完善的故障保护措施，保证系统在事故情况下，快速停机阀、紧急停机阀、事故配压阀、重锤关机装置、机械过速保护装置、分段关闭装置等组件能可靠动作。<sup>4)</sup>

## 5.2 控制功能

5.2.1 水轮机调节系统应功能齐全、逻辑设计合理、参数设置正确、硬件可靠、抗干扰能力强、通信可靠、接口齐全、控制阀与接力器动作灵活无卡涩。应能满足机组在各种工况下的安全稳定运行。

5.2.2 调节系统正常无故障且处于自动运行方式时，应能接受外部开机指令自动开机，按照一定开机规律迅速将机组转速加速至偏差小于同期带（+1%~-0.5%），并能够根据设定的调节参数自主调节机组转速，或者接受外部增速/减速调节指令，使机组转速满足同期条件。

机组开机升速过程应简单、可靠，宜根据水压变化、机组振动和主轴摆度、轴向水推力、转轮动应力等所允许的开启速度、机组惯性时间常数等确定启动规律。

5.2.3 水轮机调节系统处于自动状态时，应能自动接受外部停机指令，按照设计的停机规律自动停机。

5.2.4 水轮机调节系统应设置快速事故停机功能，在事故情况下可接收外部快速事故停机命令，使接力器能按照设定规律快速关闭导叶或折向器停机。<sup>4)</sup>

5.2.5 油压装置油压/油位低于设定的事故低油压/低油位时，应能自动发出事故低油压/低油位故障报警信号，以触发快速事故停机流程停机。<sup>4)</sup>

3) 制造厂有设计要求时，应符合设计要求。

4) 快速事故停机、紧急事故停机定义请参照 DL/T 792 和 IEC 61362。



5.2.6 水轮机调节系统应能对空载运行频率调节模式、并网运行开度调节模式、功率调节模式、孤立运行频率调节模式以及一次调频模式分别设置相应的调节参数，调节模式切换时调节参数能自动切换。

5.2.7 水轮机调节系统应具有孤网自动识别能力，带孤立负荷能稳定运行，具体按本标准 5.5 执行。

5.2.8 水轮机调节系统应具有人工水头和自动水头双重输入的功能，根据水头信号自动调整启动开度（加速开度）、空载开度限制、负载开度限制等。

5.2.9 转桨式机组调节系统应按照设定的导叶与轮叶协联曲线，根据水头信号进行自动协联。

5.2.10 水轮机调节系统应具有甩负荷后维持空载/空转或带厂用电持续运行的能力。

5.2.11 水轮机调节系统应具有完善的故障容错功能，具体按本标准 5.7 执行。

### 5.3 一次调频

5.3.1 水轮机调节系统应能投入一次调频功能，具有良好的频率/功率控制能力，以保障电网频率的稳定运行。

5.3.2 水轮机调节系统的永态转差系数  $b_p$  应不大于 4%（或调差率  $e_p \leq 3\%$ ），暂态转差系数  $b_t$ 、缓冲时间常数  $T_d$  或比例增益  $K_p$ 、积分增益  $K_i$  等参数应设置合理。

5.3.3 对大型水轮机调节系统，实测频率/转速死区  $i_x$  宜不大于 0.04%；对中小型水轮机调节系统，实测频率/转速死区  $i_x$  宜不大于 0.06%。

5.3.4 水轮机调节系统一次调频人工频率/转速死区的设置，应不大于 0.05Hz。<sup>5)</sup>

5.3.5 水轮机调节系统的频率测量分辨率等应符合本标准 5.1.7 的规定。

5.3.6 水轮机调节系统一次调频的功率调整幅度原则上不应加以限制，但应考虑对机组的最大和最小负荷限制和避开振动区与空化区运行。

5.3.7 水轮机调节系统应设置一次调频动作状态信号，并将该信号上传至监控系统，供调度部门实时监控和统计。调节系统若设置了一次调频投入/退出状态信号，该信号也应上传至监控系统。

5.3.8 在进行一次调频统计考核时，采用开度调节模式的水轮机调节系统，可将导叶/喷针开度作为响应目标；采用功率调节模式的水轮机调节系统，宜将机组有功功率作为响应目标。

5.3.9 水轮机调节系统一次调频阶跃响应的要求。<sup>6)</sup>

机组带负荷在稳定运行工况下，对于有效频差变化不低于 0.1Hz 的频率阶跃扰动，一次调频阶跃响应过程应满足以下要求之一：

- a) 以开度作为响应目标时，一次调频的开度响应行为应满足如下要求：
  - 1) 自频差超出一次调频死区开始，至接力器开始向目标开度变化时的开度响应滞后时间  $t_{hx}$ ，应不大于 2s。
  - 2) 自频差超出一次调频死区开始，至接力器位移达到 90%目标值的上升时间  $t_{0.9}$ ，应不大于 12s。
  - 3) 自频差超出一次调频死区开始，至开度调节达到稳定，所经历的时间  $t_s$  不大于 24s。
- b) 以功率作为响应目标时，一次调频的功率响应行为应满足如下要求：
  - 1) 自频差超出一次调频死区开始，至机组有功功率开始向目标功率变化时的功率响应滞后时间  $t_{hx}$ ，对于额定水头 50m 及以上的水电机组，不大于 4s；对于额定水头在 50m 以下的水电机组，不大于 8s。
  - 2) 自频差超出一次调频死区开始，至机组有功功率达到 90%目标值的上升时间  $t_{0.9}$ ，应不大于 15s。
  - 3) 自频差超出一次调频死区开始，至功率调节达到稳定，所经历的时间  $t_s$  不大于 30s。

5) 为了在电网频率变化较小的情况下，提高机组运行的稳定性，一般在水轮机调节系统设置有人工频率/转速死区。

6) 目标开度/功率是指理论计算应达到的一次调频开度/功率调整幅度。

5.3.10 运行期间对水轮机调节系统一次调频性能的要求。<sup>7)</sup>

- a) 在频差超出机组一次调频死区的 45s 内, 一次调频合格率  $G_{\text{H}}$  不小于 50%。
- b) 从频差超出机组一次调频死区开始, 至该机组本次一次调频调节过程结束, 一次调频合格率  $G_{\text{H}}$  不小于 30%。
- c) 一次调频月度投入率不低于 90%。
- d) 一次调频月度正确动作率不低于 90%。

## 5.3.11 机组一次调频与监控系统关系。

一次调频的优先级高于 AGC 或功率闭环调节, 应保证机组一次调频功能始终能够正常发挥, 当机组 AGC 投入运行或监控系统功率闭环调节方式下, 机组一次调频功能应不受监控系统影响, 一次调频应与 AGC 或功率闭环调节相互协调。其量化关系可参照本标准 6.6.1 条。

## 5.4 负荷调节

5.4.1 应根据水电厂水头的变化, 改变相应的调节参数, 保证机组有功功率调节的稳定性, 且负荷反调量和超调量较小。

5.4.2 应根据水头变化分别设置不同的负荷(负载)开度限制或直接设置最大负荷限制值, 防止机组过负荷。

5.4.3 应根据水头变化分别设置不同的最小负荷(负载)开度限制或直接设置最小负荷限制值, 防止机组逆功率运行。

5.4.4 水轮机调节系统负荷调节过程应平稳、快捷, 并具备如下功能:

- a) 在开度调节运行方式下, 应能接受监控系统的脉冲信号进行开度增减, 从而实现负荷的增减; 还应具备通过监控系统单步功率调整的功能。
- b) 在功率调节运行方式下, 应具备通过监控系统模拟量和/或通信量接口接受功率给定绝对值, 自主进行功率闭环调节的能力; 当有功功率信号故障时应自动无扰动切换至开度调节模式。

5.4.5 水轮机调节系统应与机组监控系统协调配合, 具有稳定的负荷调节能力, 保证机组的 AGC 性能满足以下要求:

- a) 从调度机构下达 AGC 命令起, 至机组开始负荷调节时的响应时间不大于 10s。
- b) AGC 负荷调节量不小于 25%额定负荷时, 调节过程中每分钟的平均负荷调节量(即负荷调节速率)应不小于 50%额定负荷。

5.4.6 在功率给定或开度给定恒定时, 机组实际有功功率或开度与给定值的偏差应为  $-1\% \sim +1\%$ 。

5.5 孤立运行<sup>8)</sup>

5.5.1 水轮机调节系统应能保证机组在单机带负荷、孤立运行工况下的稳定运行, 不出现大范围的波动; 频率变化衰减度(与起始偏差符号相同的第二个转速偏差峰值与起始偏差峰值之比)应不大于 25%。

5.5.2 当机组与大电网解列或部分线路跳开(但发电机出口断路器依然闭合)或带孤立负荷运行时, 水轮机调节系统应能自行判断并切至孤立运行模式。

5.5.3 水轮机调节系统孤立运行模式的投入和退出, 必要时应允许人工切换, 其状态宜在人机界面上有明显标志。

5.5.4 水轮机调节系统在孤立调节过程中应闭锁一次调频控制参数, 以避免频率调节过程不稳定或出现垮网事故。

7) 本节内容侧重于实际电网频率变化过程中的一次调频响应行为, 此时频率变化一般不是阶跃变化; 而 5.3.9 侧重于频率阶跃变化过程中的调节系统一次调频响应行为。计算一次调频合格率  $G_{\text{H}}$  之理论积分电量  $Q_{\text{JS}}$  时,  $e_p$  一律按 3% 计算, 计算时要剔除监控系统对机组有功功率调节量的影响。

8) 若孤立[孤岛][孤网]运行时负荷变化十分频繁且变化幅度过大, 将引起调节过程不稳定。

5.5.5 孤立运行模式下,水轮机调节系统宜采用PID调节,PID调节参数、人工频率/转速死区、永态转差系数等参数应结合电网实际情况通过试验优化选择。

## 5.6 油压装置及自动化元件

5.6.1 油压装置的压力容器可采用油—气接触式压力罐,也可采用油—气隔离式蓄能器。油—气接触式压力罐的工作油压不宜超过12.5MPa。

5.6.2 系统油温应保持在10℃~50℃,否则应设置油温调节装置(冷却器和/或加热器)。

5.6.3 事故低油压 $p_T$ 的选择,应能做到在完成一次全行程的关机操作后,压力不降到最低操作压力 $p_R$ 以下。最低操作压力 $p_R$ 根据机组所需的调速功<sup>9)</sup> $E_R$ (N·m)和所用的接力器容积 $V_S$ (m<sup>3</sup>)求得:

$$p_R = E_R / V_S \times 10^{-6} \text{ (MPa)}$$

5.6.4 压力罐可用油的体积。

在正常工作油压下限和油泵不打油时,压力罐的容积至少应能在压力降不超过正常工作油压下限和最低操作油压之差的条件下提供规定的各接力器行程数,对混流式、定桨式水轮机为3个导叶接力器行程;对转桨式水轮机,除3个导叶接力器行程外,还要求1.5~2个轮叶接力器行程;对冲击式水轮机,除3个折向器接力器行程外,还要求1.5~2个喷针接力器行程。

5.6.5 在工作油压上限,油—气接触式的压力罐内油和空气体积比规定为1/3~1/2。

5.6.6 组合式和分离式油压装置应至少设置2台油泵,每台油泵的输油量足以补充漏油量,并至少有2倍的安全系数。

5.6.7 设有自动补气装置的油压装置应设空气安全阀,其动作值为工作油压上限的114%。

5.6.8 油压装置各压力信号器整定值的动作偏差,应为整定值的-2%~+2%。

5.6.9 当油压低于正常工作油压下限的6%~8%时,备用油泵应启动;当油压继续降低至事故低油压时,作用于快速事故停机的压力信号器应立即动作。

5.6.10 油泵应采用高效率产品,运转应平稳。三螺杆泵在规定工况下无汽蚀运行时,其轴承处的振动烈度应符合JB/T 8097的要求;在规定压力下的输油量和轴功率的性能容差参照JB/T 8091,泵的效率下降值不得超过规定值的5%。液压齿轮泵的空载排量,在额定压力、额定转速工况下的容积效率和总效率不得低于JB/T 7041的要求。

5.6.11 主、备用油泵运行应能自动轮换,可采用按油泵运行次数或运行时间进行轮换。

5.6.12 自动补气装置及油位信号器动作应正确、可靠。

5.6.13 导叶分段关闭装置最小动作压力宜不大于1.7MPa,动作延迟时间应小于0.3s。

5.6.14 事故配压阀最小动作压力宜不大于1.7MPa,动作延迟时间应小于0.5s。

5.6.15 事故配压阀、重锤关机装置动作时的关机时间整定应满足调节保证计算要求。

5.6.16 机械超速装置应能通过纯液压回路动作事故配压阀关闭导叶或折向器。

## 5.7 故障保护与容错

5.7.1 水轮机调节系统应能诊断水头信号故障。水头信号故障时可切换至人工水头信号,切换时水轮机主接力器的位移变化应在其全行程的±1%范围内,同时发出报警信息。

5.7.2 水轮机调节系统应能诊断机组频率测量故障,对于采用多通道测频方式的调速器,当主用测频通道信号故障时,应自动切换至备用测频通道稳定运行,切换过程中水轮机主接力器的位移变化应在其全行程的±1%范围内,同时发出报警信息。

当主、备通道机组频率信号全部消失时,在并网发电状态,应保持当前负荷;在离网状态,应自行触发停机保护;同时发出报警信息。

5.7.3 水轮机调节系统应能诊断位移反馈信号故障。对于采用多通道位移反馈的调速器,当主用通道信号故障时,应自动切换至备用位移反馈信号稳定运行,切换过程中水轮机主接力器的位移变化应在

9) 包括摩擦。

其全行程的 $\pm 1\%$ 范围内，同时发出报警信息。

当主、备通道位移反馈信号全部消失时，在并网发电状态，应保持当前负荷；在离网状态，应自行触发关机保护；同时发出报警信息。

5.7.4 采用功率调节模式的调速器应能自动诊断有功功率信号故障，有功功率信号故障时应自行切换至开度调节模式运行，并保持当前负荷，切换过程中水轮机主接力器的位移变化应在其全行程的 $\pm 1\%$ 范围内，同时发出报警信息。

5.7.5 调速器应能诊断增减负荷故障，拒绝执行错误指令，防止机组有功功率越限运行。

5.7.6 工作电源和备用电源相互切换，以及主、备电源全部消失与恢复前后，水轮机主接力器的位移变化应在其全行程的 $\pm 1\%$ 范围内。

5.7.7 具有多微机调节器的调速器应能自动诊断微机调节器故障，调节器之间应能自动容错，主、备调节器切换时水轮机主接力器的位移变化应在其全行程的 $\pm 1\%$ 范围内，同时发出报警信息。

5.7.8 在稳定状态下，调节（控制）模式（频率调节/控制、功率调节/控制、开度调节/控制、水位调节/控制和流量调节/控制）相互切换时，水轮机主接力器的位移变化应在其全行程的 $\pm 1\%$ 范围内。

5.7.9 在压力油罐为事故低油压和/或事故低油位时，应保证接力器在设计的关闭时间内关机。

## 6 试验

### 6.1 常规试验

水轮机调节系统的常规试验按本标准 5.1.5 执行。

### 6.2 一次调频试验

#### 6.2.1 试验准备

将调速器切换至手动，断开调速器机组频率测量端，将频率信号源接入调速器机组频率测量端，由频率信号源输出额定频率信号。

#### 6.2.2 调速器测频分辨率和精度校验

在调速器手动状态下，逐步改变频率信号源输出频率，记录调速器频率测量值，验证测频分辨率是否符合 5.1.7 的要求，测频误差是否满足设计要求。

#### 6.2.3 一次调频频率/转速死区及永态转差系数校验

参照 GB/T 9652.2—2007 的 6.13.2、6.13.3 节或 DL/T 496 的规定进行。

#### 6.2.4 一次调频频率阶跃扰动试验

调速器在自动运行方式下，投入一次调频功能，机组带 60%~90%额定负荷稳定运行，通过信号源在额定频率基础上施加正负偏差的频率阶跃信号，有效频率偏差绝对值应不小于 0.1Hz，记录信号源频率、主接力器位移、机组有功功率等信号的变化过程。

按照图 1 所示的一次调频阶跃响应过程，以目标功率/开度为依据，计算一次调频滞后时间  $t_{hx}$ 、上

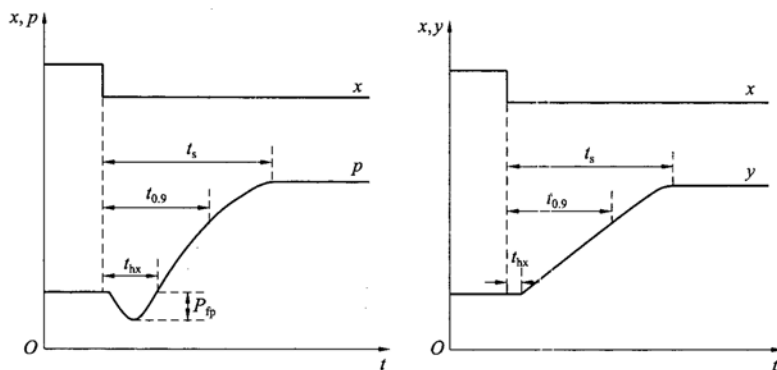


图 1 一次调频频率阶跃扰动时的机组有功功率/开度调节过程示意



升时间 $t_{0.9}$ 、稳定时间 $t_s$ 等指标。根据试验结果优化调整一次调频调节参数，在性能指标满足一次调频规定值的前提下，选取功率反调 $P_p$ 小的一组参数作为实际并网运行的一次调频调节参数。

#### 6.2.5 实际电网频率扰动下的一次调频试验

- a) 调速器在自动运行方式下，投入一次调频功能，机组带 60%~90%额定负荷运行，通过频率信号源施加一段与实际电网频率扰动过程相似的频率信号，有效频率偏差绝对值应不小于 0.1Hz，记录信号源频率、主接力器位移、机组有功功率等信号的变化过程曲线。
- b) 将调速器切至手动运行方式，断开频率信号源的输出线，恢复调速器的机组频率信号，检查无误后，将调速器恢复至自动运行方式。然后投入一次调频功能，人工频率/转速死区<sup>10)</sup>置 0Hz~0.03Hz，使机组带 60%~90%额定负荷运行，记录实际电网频率变化时机组频率、接力器位移、机组有功功率等信号的变化过程曲线。

### 6.3 参数测试试验

#### 6.3.1 参数测试总体原则

6.3.1.1 由于受数据获取和程序编制的限制，在满足稳定性分析要求的前提下，可采用具有适当精度的简化数学模型。数学模型的确立既要考虑水轮机调节系统的非线性特性<sup>11)</sup>，又要考虑模型不能过于复杂，以满足电力系统稳定计算的要求。

6.3.1.2 通过测试、辨识，建立与实际水轮机调节系统结构一致的系统数学模型，即原型模型。

6.3.1.3 对于具有确定结构和确定参数的环节，在对制造厂及设计部门提供的水轮机、引水系统及水轮机调节系统设计资料分析计算的基础上，可以采用机理建模的方法确定环节的数学模型。

6.3.1.4 对于具有确定结构但参数不确定的环节，根据环节的特点，确定环节参数的范围，建立环节的初始数学模型，用系统辨识的方法确定环节的数学模型。

6.3.1.5 对于具有非线性复杂结构的环节，根据环节的工作原理，对环节进行线性化处理，确定环节的结构和需要确定的参数，建立环节的初始数学模型，用系统辨识的方法确定环节的数学模型。环节线性化处理时，既要反映环节的工作原理和特点，又要便于实现。

6.3.1.6 根据原型模型建立电力系统稳定计算用的水轮机调节系统模型——计算模型。

6.3.1.7 可选择与原型模型结构一致的计算模型——等同计算模型。等同计算模型可以是电力系统计算程序中的固定模型，也可以是其自定义模型，直接将原型模型参数转换为等同计算模型参数。通过对机组的阶跃响应仿真和实测试验校验，最终确认等同计算模型参数。

6.3.1.8 无法选择与原型模型结构一致的计算模型时，选择与实际系统结构相近的计算模型——近似计算模型，进行计算校验，调整近似计算模型的参数使得两种模型响应的差别在允许范围内。

6.3.1.9 对建立的水轮机调节系统计算模型，进行仿真结果和实测试验结果的校验对比，即置信度验证。

6.3.1.10 水轮机调节系统参数标么化处理。

- a) 标么值等于实际值除以基准值。
- b) 频率的基准值为系统的额定频率。
- c) 导叶/喷针接力器位移的基准值为导叶/喷针接力器最大行程，轮叶/折向器接力器位移的基准值为轮叶/折向器接力器最大行程。
- d) 工作水头的基准值为水轮机额定水头。
- e) 机组出力的基准值为机组额定出力。
- f) 水轮机流量的基准值为水轮机的额定流量。

#### 6.3.2 充水前调节器的试验

- a) 频率测量单元的校验。

10) 若实际电网频率变化很小，试验时可把人工频率/转速死区置于 0Hz。

11) 例如水锤的反调节作用、模型参数随水轮机的运行工况和水头不同而有所差异等。

参照本标准 6.2.2 条进行试验。

- b) 永态转差系数和人工频率/转速死区校验。

参照 GB/T 9652.2—2007 的 6.13 条调速器静态特性试验进行。

- c) PID 调节参数的校验。

积分增益  $K_I$  的校验参照 GB/T 9652.2—2007 的 6.11 条进行。

比例增益  $K_P$  的校验：置  $K_I$ 、 $K_D$ 、 $b_p$ 、 $E_f$  为 0，对调节器施加频率阶跃信号，根据调节器的输出计算  $K_P$ 。

微分增益  $K_D$  的校验：置  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $b_p$ 、 $E_f$  为 0，对调节器施加以一定斜率变化的频率信号，根据调节器的输出计算  $K_D$  和微分环节时间常数  $T_v$ 。

### 6.3.3 充水前随动系统的试验

- a) 导叶接力器关闭与开启时间测定（转桨式机组还包括轮叶接力器，冲击式机组为喷针/折向器）。

参照 GB/T 9652.2—2007 的 6.17 条接力器关闭与开启时间范围测定。

- b) 随动系统扰动试验。

置  $K_I$ 、 $K_D$ 、 $b_p$ 、 $E_f$  为 0， $K_P$  为一定值，模拟机组并网，通过信号源在额定频率基础上施加不同正负偏差的频率阶跃扰动信号，或通过调速器本身的扰动程序进行试验，随动系统的阶跃扰动量一般应为接力器全行程的  $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ 。

- c) 接力器反应时间常数  $T_y$  测定试验。

方法 1：若试验条件满足 GB/T 9652.2—2007 的 6.19 条测试接力器反应时间常数的要求，可参照该标准进行。

方法 2：置  $K_P$ 、 $K_D$ 、 $b_p$ 、 $E_f$  为 0， $K_I$  为一定值，模拟机组并网，通过信号源在额定频率基础上施加绝对值逐渐增大的正负偏差频率阶跃扰动信号，正负方向上各测 6 点以上，记录主配压阀行程和主接力器速度，绘制主配压阀相对行程与主接力器相对速度的关系曲线，求得接力器反应时间常数  $T_y$ 。

方法 3：有条件的情况下，也可以通过调速器程序进行随动系统的开环阶跃扰动试验，正负方向上各测 6 点以上，将阶跃量折算至随动系统的输入点，绘制折算后的阶跃量与主接力器相对速度的关系曲线，曲线斜率的倒数为接力器反应时间常数  $T_y$ 。

- d) 转桨式机组协联关系测试。

参照 GB/T 9652.2—2007 的 6.14 条协联曲线测定试验。

### 6.3.4 模拟并网工况下的频率扰动试验

蜗壳未充水，短接断路器辅助接点信号，模拟机组并网运行工况，调速器处于自动运行方式；切除人工频率/转速死区；置增益为整定值，频率给定为额定值。

由频率信号源向调速器提供额定的机组频率输入信号，以开度给定将导叶/喷针接力器位移调整到 50% 行程附近。改变输入频率进行频率阶跃扰动，记录频率变化前后接力器位移等信号的变化过程曲线。

试验在选定 2 组～3 组不同的调速器 PID 参数组合下进行。

### 6.3.5 水轮机调节系统并网运行动态试验

在机组并网带负荷情况下进行并网运行动态试验（对运行水头变化范围较大的机组，有条件时，宜选取 3 个不同的典型水头进行动态试验），试验项目一般包括：

- a) 机组开度—有功功率特性测试。

机组并网带负荷稳定运行，通过改变机组功率/开度给定值或其他方式进行负荷增减调整，记录机组从空载至额定负荷范围内导叶/喷针开度与有功功率关系。

b) 水轮机出力对导叶、轮叶接力器的传递系数测试。<sup>12)</sup>

- 1) 将调速器切至手动,退出协联关系,保持轮叶主接力器位置不变,以一定步长逐步增加导叶开度,待机组稳定后,记录调整前后导叶开度、机组有功功率等信号;再以一定步长逐步减少导叶开度至初始开度,待机组稳定后,记录调整前后导叶开度、机组有功功率等信号。
- 2) 将调速器切至手动,退出协联关系,保持导叶主接力器位置不变,以一定步长逐步增加轮叶开度,待机组稳定后,记录调整前后轮叶开度、机组有功功率等信号;再以一定步长逐步减少轮叶开度至初始开度,待机组稳定后,记录调整前后轮叶开度、机组有功功率等信号。

## c) 频率阶跃试验。

参照本标准 6.2.4 条进行。

## d) 实际电网频率扰动试验。

参照本标准 6.2.5 条进行。

## e) 并网运行下负荷扰动试验。

机组并网,使机组在选定的水轮机工作点稳定运行,通过改变调速器开度/功率给定的方法进行负荷阶跃扰动,记录开度/负荷改变前后接力器位移、蜗壳进口(导叶前)水压脉动和机组有功功率等信号的变化过程。试验一般在机组的 60%~90%额定负荷下进行,负荷变化一般控制在机组的 5%~10%额定负荷。

## f) 机组惯性时间常数测试。

机组惯性应包括发电机、水轮机以及流道水体惯性,通过甩 50%以上额定负荷测试机组惯性时间常数,试验参照 GB/T 9652.2—2007 的 6.23 节或 DL/T 496 的规定进行。

## 6.4 负荷调节试验

## 6.4.1 试验条件

机组并网带负荷在稳定工况下运行,调速器处于自动运行方式,一次调频功能退出,监控系统有功功率调节正常。

## 6.4.2 试验方法

调速器置开度或功率调节模式运行,通过监控系统改变调速器的有功功率给定值,有功功率给定值与机组当前实际有功功率偏差应不低于 25%额定负荷,记录机组有功功率、接力器位移、负荷增减脉冲等信号的变化过程。根据负荷调节过程调整相关参数,选择负荷调节速度快、超调量及反调量小的一组参数作为负荷调节参数。

应分别进行负荷增加、负荷减小试验。

对于通过监控系统模拟量和/或通信量接口接受功率给定绝对值的调速器,试验方法同上。

## 6.5 孤立调节试验

调速器处于真实发电运行状态或模拟的孤立运行状态,调整孤立发电的相关调节参数,通过较大幅度的负荷/频率扰动,记录频率、开度/有功功率等信号的变化过程,选择一组稳定性好、频率变化衰减度小的调节参数,以供孤立调节使用。

- a) 孤立调节参数的初步整定:使机组处于空载额定转速运行工况,短接发电机出口断路器辅助触点,使调速器处于模拟的并网发电运行状态,通过频率扰动的方法,整定调节参数,取得一组调节效果较好的参数,作为孤立调节的初选参数。有效频率扰动偏差绝对值应不小于 2Hz。

12) 该方法是以前转桨式机组为例描述的,对于定桨式机组、混流式机组、冲击式机组,试验方法与之相仿。注意:试验时由于退出了协联关系,有功功率调整幅度不能过大,以免引起机组振动或故障。

- b) 有条件时可以进行实际孤立调节试验：机组并网运行，带不少于 25% 的额定负荷，待负荷稳定后，通过线路开关的操作，使机组突然切入孤网，观测并记录频率、接力器位移/有功功率等信号在大网转孤网过程中的变化，及其随后的孤立运行中的调节过程，验证调节过程是否正常稳定；在此过程中，可以进一步调整、优化步骤 a) 初选的孤立调节参数。
- c) 当孤网试验条件不具备时，可采用以下方法验证孤立调节过程：机组并入电网运行，带不少于 25% 的额定负荷，待负荷稳定后，跳开主变压器高压侧断路器，但发电机出口断路器依然保持闭合，观测并记录频率、接力器位移等信号在此切换过程中的变化，验证调节过程是否正常稳定；在该试验过程中，也可以对步骤 a) 初选的孤立调节参数进行适当调整、优化。

## 6.6 其他特殊试验

### 6.6.1 一次调频与 AGC 协调性试验<sup>13)</sup>

机组带负荷稳定运行，监控系统有功功率闭环调节投入、一次调频投入，监控系统接收来自调速器的一次调频功能投入状态、一次调频动作信号正常。按照本标准 6.2.4 条的方法进行频率阶跃扰动，在施加的频率扰动信号未回到一次调频死区范围内、同时监控系统未下发新的有功功率给定值情况下，机组有功功率稳态值  $P_1$  应等于：

$$P_1 = P_c + P_{PFC}$$

式中：

- $P_1$  ——调节稳定后机组有功功率；
- $P_c$  ——监控系统有功功率给定值；
- $P_{PFC}$  ——一次调频有功功率调节量。

待一次调频调节稳定后，保持施加的频率扰动信号不变，监控系统下发给定值不低于 5% 额定有功功率的扰动量  $\Delta P$ ，记录机组负荷调节过程，机组有功功率稳态值  $P_2$  应等于：

$$P_2 = P_c + P_{PFC} + \Delta P$$

有功功率调节稳定后将频率信号恢复至 50.0Hz 额定值，记录机组负荷调节过程，此时机组有功功率稳态值  $P_2$  应等于：

$$P_2 = P_c + \Delta P$$

### 6.6.2 黑启动试验<sup>14)</sup>

本条黑启动特指水电厂在无厂用交流电的情况下，用电站直流系统蓄电池储存的电能和油压装置压力罐储存的液压能，完成机组启动，恢复厂用电，并配合电网调度恢复电网运行的过程。应按电网调度部门的要求完成相应的黑启动试验，满足在全厂停电后的电网和电站安全及厂用电源恢复的需要。

- a) 试验前应确认试验机组及辅机设备无故障、无事故，保护未动作，处于热备用状态，油压装置油压/油位正常、轴承高位油箱油位正常、高压顶起油泵<sup>15)</sup>正常、轴承润滑油泵<sup>15)</sup>正常。
- b) 试验机组的油压装置应满足本标准 5.6.3 条和 5.6.4 条的技术要求。
- c) 试验过程中，运行人员应注意监视上游水位及机组顶盖和集水井水位，检查检修密封围带投入正常，防止水淹水导及厂房。
- d) 试验过程中，应注意监视、记录机组油压装置油压、油位，高压顶起油泵，轴承润滑油泵；若油压装置油压下降较快，可以考虑手动临时补气。

13) 试验结果数据拟剔除监控系统或调速器功率死区的影响。

14) 除本条所述的黑启动方式外，还有通过采用柴油发电机组或其他外供交流电源作为启动电源的方式实现黑启动。因为后者对于水轮机调节系统的操作并无特殊要求，故本标准暂不涉及该方式下的黑启动试验。

15) 对于要求在任何交流电能的情况下也能实现黑启动的机组，其配套的高压顶起油泵、轴承润滑油泵，拟采用直流电动机直接驱动；若条件不具备（即油泵为交流驱动），则需要考虑设置专用的直流逆变供电装置。



- e) 根据实际要求可以退出机组事故低油压、低油位保护，以手动方式启动机组，如遇到紧急情况，拟手动快速事故停机或紧急事故停机。
- f) 机组升速到额定转速后，迅速起励升压，带上厂用电，完成黑启动过程。
- g) 机组黑启动成功与否，主要取决于油压装置的油压、油位和蓄电池的放电时间，由于油压装置的油压、油位及蓄电池的电能输出随着时间的推移而逐渐降低，因此，在进行事故处理时要迅速、果断、准确。

附 录 A  
(资料性附录)  
水轮机调节系统基本技术参数

A.1 机组参数

- a) 机组编号;
- b) 水轮机型号;
- c) 额定出力;
- d) 额定转速;
- e) 飞逸转速;
- f) 额定流量;
- g) 最大流量;
- h) 额定水头;
- i) 最大水头;
- j) 最小水头;
- k) 机组转动惯量(飞轮力矩)  $GD^2$  或机组惯性时间常数;
- l) 转桨式水轮机的协联关系曲线;
- m) 接力器尺寸;
- n) 水轮机综合特性曲线;
- o) 水轮机飞逸特性曲线。

A.2 引水系统参数

- a) 引水系统布置图、相关技术参数;
- b) 压力引水钢管、蜗壳、尾水管过水系统的  $\Sigma L_i V_i$ ;
- c) 水流惯性时间常数。

A.3 调节保证计算数据

- a) 接力器关闭时间、关闭规律;
- b) 最大水压上升;
- c) 最大转速上升。

A.4 水轮机控制系统参数

- a) 水轮机调节(控制)系统基本工作原理;
- b) 水轮机调节(控制)系统框图、逻辑控制图;
- c) 永态转差系数(或调差率);
- d) 随动系统电—液、电—机转换装置时间常数;
- e) 水轮机导叶/喷针、轮叶/折向器主接力器反应时间常数;
- f) 设计压力;
- g) 最低操作油压;
- h) 压油罐容积;
- i) 油泵额定压力、流量;

- j) 空载工况频率调节模式下调速器 PID 参数及各环节限幅值;
- k) 负载工况开度调节模式下调速器 PID 参数及各环节限幅值;
- l) 负载工况功率调节模式下调速器 PID 参数及各环节限幅值;
- m) 一次调频频率/转速人工死区;
- n) 一次调频 PID 参数;
- o) 孤网调节 PID 参数。

**A.5 水轮机不同运行水头下的空载（零负荷）开度、满负荷开度**

**A.6 安全保护装置定值**

附录 B  
(资料性附录)

水轮机调节系统一次调频参数

水轮机调节系统一次调频参数汇总见表 B.1。

表 B.1 水轮机调节系统一次调频参数汇总表

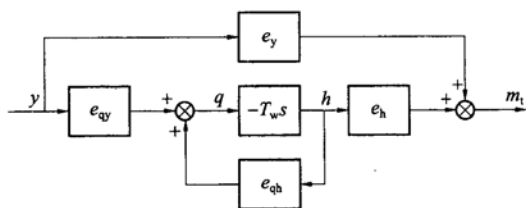
项 目		内 容	备 注
机组额定容量			
水轮机生产厂、型号			
发电机生产厂、型号			
机组转动惯量(飞轮力矩) $GD^2$ 或机组惯性时间常数 $T_J$			
引水钢管、蜗壳、尾水管过水系统的 $\Sigma L/V_i$			
机组额定转速 $n_r$			
接力器尺寸			
调速器生产厂、型号(机柜和电柜可分别列出)			
调速器传递函数或原理框图(若为变结构、变参数等调速器需详细说明)			
永态转差系数 $b_p$ (调差率 $e_p$ )	可设定范围		
	实际设定值		
	实测值		
调节系统实测转速死区			
调节系统实测静特性线性度误差			
人工频率/转速死区调整范围			
人工频率/转速死区调整分辨率			
频率给定范围、调整分辨率			
功率给定范围			
功率调节死区			
调节参数调整范围、调整分辨率			
一次调频 PID 调节参数			
一次调频负荷响应滞后时间 $t_{hx}$			
一次调频上升时间 $t_{0.9}$			
一次调频稳定时间 $t_s$			
一次调频功率反调 $P_{fp}$			

## 附录 C

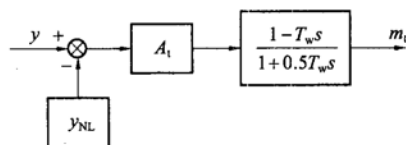
(资料性附录)

## 常见水轮机及其调节(控制)系统数学模型

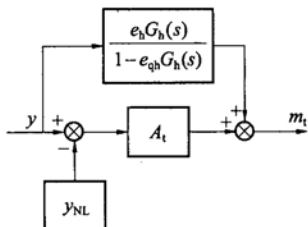
C.1 混流式、定桨式、冲击式水轮机及压力引水系统模型如图 C.1 所示。



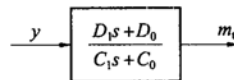
a) 混流式、定桨式、冲击式水轮机模型之一



b) 混流式、定桨式、冲击式水轮机模型之二



c) 混流式、定桨式、冲击式水轮机模型之三



d) 混流式、定桨式、冲击式水轮机模型之四

其中:

 $e_y$ —水轮机力矩对导叶/喷针接力器行程的传递系数; $e_{qy}$ —水轮机流量对导叶/喷针接力器行程的传递系数; $e_h$ —水轮机力矩对水头的传递系数; $e_{qh}$ —水轮机流量对水头的传递系数; $m_t$ —水轮机力矩(标幺值); $y$ —导叶/喷针接力器行程(标幺值); $y_{NL}$ —空载开度(标幺值); $q$ —水轮机流量(标幺值); $h$ —水轮机工作水头(标幺值); $T_w$ —水流惯性时间常数(s); $s$ —拉普拉斯算子;

$A_t$ —水轮机增益系数( $A_t = \frac{k}{y_{FL} - y_{NL}}$ 。  $y_{FL}$  为额定负荷开度, 标幺值;  $k$  为修正系数, 一般取 1, 当主接力器行程与机组有功功率稳态值存在较大的非线性时, 取 0.8~1.2);

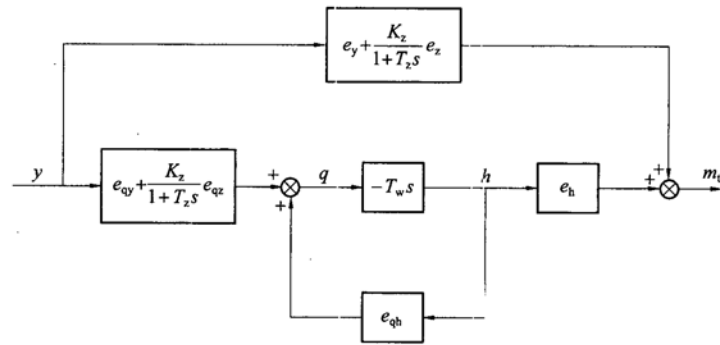
$G_h(s)$ —压力引水系统水击模型  $\left[ G_h(s) = \frac{b_3 s^3 + b_1 s}{a_2 s^2 + a_0} \right]$ , 其中  $b_3 = -T_r^3 h_w^2$ ,  $b_1 = -24 T_r h_w^2$ ,  $a_2 = 3 T_r^2 h_w$ ,  $a_0 = 24 h_w$ 。而

$$h_w = \frac{T_w}{T_r}, \quad h_w \text{ 为引水管特征系数, } T_r \text{ 为管道反射时间常数 (s)};$$

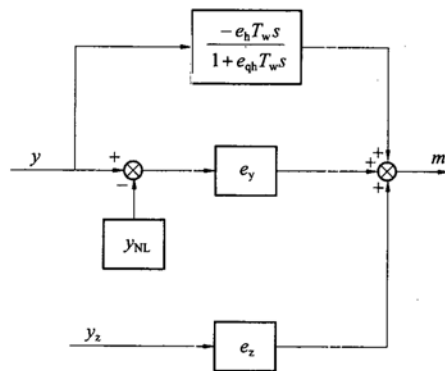
$C_0$ 、 $C_1$ 、 $D_0$ 、 $D_1$ —水轮机及引水系统传递函数的系数。

图 C.1 混流式、定桨式、冲击式水轮机模型

C.2 转桨式水轮机及压力引水系统模型如图 C.2 所示。



a) 转桨式水轮机模型之一



b) 转桨式水轮机模型之二

其中:

$K_z$ —导叶接力器行程到轮叶接力器行程的放大系数;

$T_z$ —轮叶随动系统的时间常数 (s);

$y_z$ —轮叶接力器行程, 标么值;

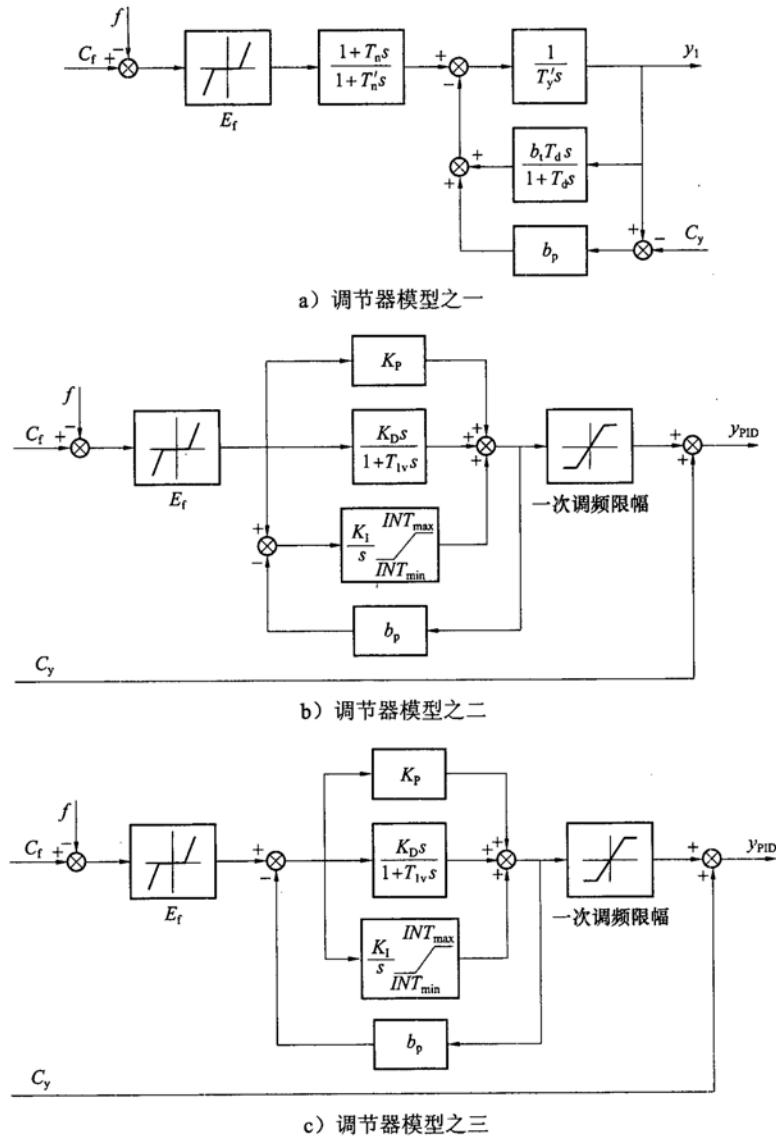
$e_z$ —水轮机力矩对轮叶接力器行程的传递系数;

$e_{qz}$ —水轮机流量对轮叶接力器行程的传递系数。

图 C.2 转桨式水轮机模型

C.3 水轮机调节(控制)系统之调节器与电液随动系统模型。

C.3.1 调节器一般可用图 C.3 所示的 3 种模型表示。

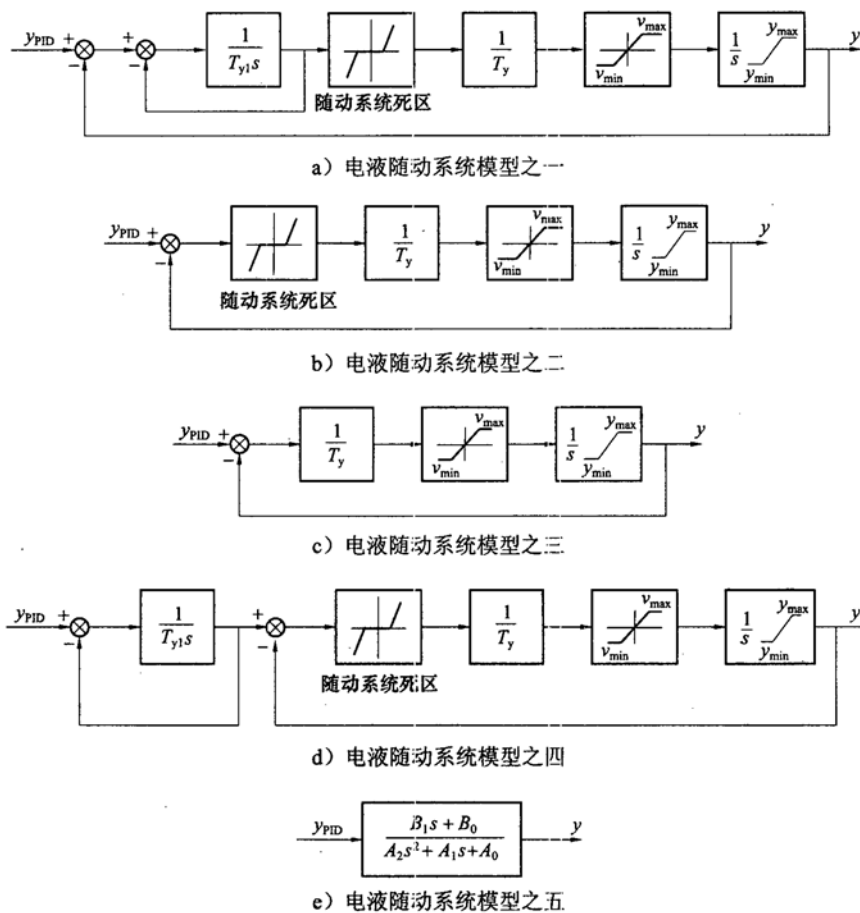


其中:

- |                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| $C_f$ —频率给定 (标么值);       | $T_d$ —缓冲时间常数 (s);      |
| $C_y$ —开度给定 (标么值);       | $K_P$ —比例增益;            |
| $y_{PID}$ —调节器输出 (标么值);  | $K_I$ —积分增益 (1/s);      |
| $f$ —机组频率 (标么值);         | $K_D$ —微分增益 (s);        |
| $E_f$ —人工频率/转速死区 (标么值);  | $T_{1v}$ —微分环节时间常数 (s); |
| $T_n$ —加速时间常数 (s);       | $b_p$ —永态转差系数;          |
| $T'_n$ —测量环节时间常数 (s);    | $INT_{max}$ —积分输出上限;    |
| $T'_y$ —中间接力器反应时间常数 (s); | $INT_{min}$ —积分输出下限。    |
| $b_t$ —暂态转差系数;           |                         |

图 C.3 调节器模型

C.3.2 电液随动系统一般可用图 C.4 所示的 5 种模型表示。



其中:

$T_{y1}$ —电液转换环节时间常数 (s);

$T_y$ —接力器时间常数 (s);

$v_{\max}$ —接力器最快开启速度 (1/s)  $\left(v_{\max} = \frac{1}{T_s}\right)$ ;

$T_s$ —接力器最短开启时间 (s);

$v_{\min}$ —接力器最快关闭速度 (1/s)  $\left(v_{\min} = \frac{1}{T_f}\right)$ ;

$T_f$ —接力器最短关闭时间 (s);

$y_{\max}$ —接力器位移上限 (即全开位置, 其值为 1);

$y_{\min}$ —接力器位移下限 (即全关位置, 其值为 0);

$A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ —电液随动系统传递函数的系数。

图 C.4 电液随动系统模型



## 附录 D (资料性附录)

### 水轮机调节系统对电力系统稳定性的影响

对于电力系统振荡的最优阻尼而言，由水轮机调节系统动作引起的机组机械力矩变化应在转速变化的相反相位作出响应；此原则既可以用于孤立运行的系统，也可以用于互联运行的大电网。尽管对于非常低的频率而言，调节动作仅仅在物理上可行；然而，只要从负的转速变化到机组机械力矩变化的相位滞后小于  $90^\circ$ ，就会存在一定的阻尼。比如，水轮机调节系统响应频率在  $0.1\text{Hz}$  以下时的调节动作对阻尼的贡献如图 D.1 所示，图中包含了控制器响应、接力器响应和水柱响应。

应当指出，水轮机调节系统的调节动作不是电力系统振荡阻尼的唯一来源，这是因为发电机阻尼绕组、磁场绕组和电力系统稳定器在各自允许的频率范围中都会产生阻尼。

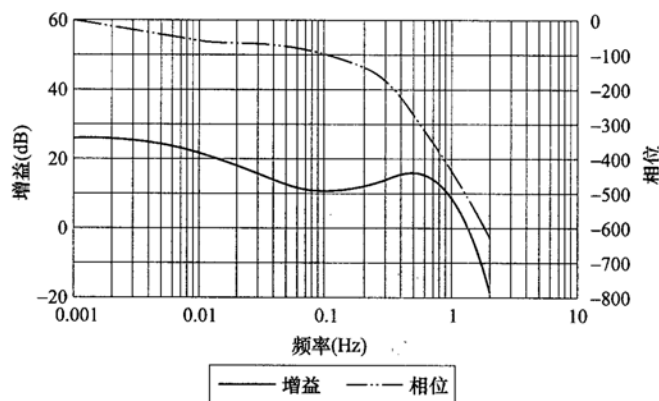


图 D.1 水轮机从转速到力矩的典型频率响应

在频率高于  $0.1\text{Hz}$  时，机组的机械力矩相位由于水柱的影响而快速下降；然而，增益却上升了，这是因为水流增益本质上是恒定值，并且水轮机调节系统增益持续增加。考虑到电力系统中的单一水轮机调节系统，在较高频率时，它可能有助于阻尼振荡，或有助于非阻尼振荡，这取决于确切的振荡频率。幸运的是，电力系统阻尼的其他来源可以在一个更为宽广的频率范围内提供阻尼，并且可以覆盖任何由水轮机调节系统产生的非阻尼。

虽然并网运行水轮机调节系统不可能在所有频率范围内提供阻尼，但是它们有助于电力系统频率的稳定控制。当系统作为一个整体考虑时，机组机械力矩变化是由整个电力系统的惯性有关的系统频率变化而引起，因此，其开环系统频率响应类似于图 D.2。一般而言，如果电力系统的惯性类似于作为水轮机调节系统调整基础的单台机组惯性，那么系统是可以稳定的。

对于调整不佳的水轮机调节系统，有可能导致或恶化包括水流在内的局部原动机振荡，接下来还会影响区域的系统振荡。同样，在对互联运行的大电网的系统响应过程中，调整不佳的自动电压调节器 (AVR) 或电力系统稳定器也会导致类似的总体振荡激励。

对于与孤立电气负荷相连的发电机的运行而言，可以调整现代静态励磁调节系统，快速响应从而维持发电机机端电压恒定。相比较而言，老式旋转励磁机的响应速度较为缓慢，从而导致发电机机端电压随着系统负荷或者发电机转速的变化而变化。在缓慢动作的励磁机作用下，由发电机转速变化引起的发电机机端电压的动态变化有助于被调节的机组转速稳定。这种稳定作用是负荷的电气制动效应带来的，负荷的电气制动效应是随转速而定的发电机输出电压的函数，比如说，发电机转速的增加会引起其电压瞬间增大，电压的增大一般会导致对负荷力矩需求的增加，从而限制转速的上升。目前通

过对励磁系统广泛的技术升级改造,使自动电压调节器响应速度更快的做法已经屡见不鲜,对于带孤立电气负荷的运行方式而言,响应速度缓慢的老式自动电压调节器转速稳定效应的丧失,将会降低水轮机调节系统的转速稳定性。

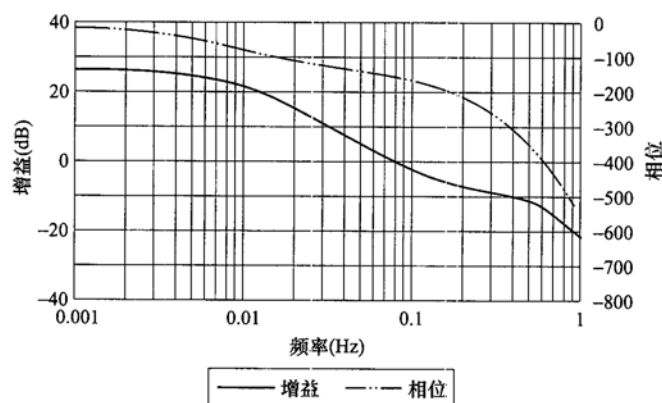


图 D.2 典型的孤立机组调节系统总开环频率响应

在水轮机调节系统和电力系统稳定器的调节过程中,目前一般认为,这两种控制系统之间通常没有大的相互作用。通过适当调整水轮机调节系统的调节作用,可以使其在孤立系统中表现出良好的频率稳定性以及适当的分级负荷响应;通过适当调整电力系统稳定器的调节作用,可以补偿励磁系统中的相位滞后和发电机的特性,使发电机电气阻尼转矩部分增大。

迄今为止,在技术竞争方面,对于水轮机调节系统和电力系统稳定器的各自调节和控制功能之间的相互依赖或者相互作用,并没有太多的讨论与研究。然而,这两种控制系统在时间响应方面的明显差异性已经引起了广泛的关注。

对于控制由水轮机尾水管浪涌引起的功率摆动的研究表明,把水压以及电气功率信号作为电力系统稳定器的输入,只能实现有限的阻尼效应,并没发现原有浪涌的显著变化,仅看到反应浪涌的电力系统摆动减小。

电力系统稳定器的理想作用是产生发电机阻尼转矩,缓冲与电力系统相连的机组的功率摆动。在特定情况下,它还可以抵消来自于高增益自动电压调节器的负阻尼。通过缓冲水柱能量振荡以及与低频功率摆动相关的水轮机力矩振荡,水轮机调节系统在控制稳态频率和低频( $<0.1\text{Hz}$ )扰动方面尽管发挥着历史意义的作用,但目前普遍认为,由于与发电机励磁系统相关的电气时间常数通常远远小于与水流和发电机组旋转部件相关的机械时间常数,因此电力系统稳定器能够快速衰减电力系统中的局部振荡模式和区域内的功率摆动,而不需要与水轮机调节系统共同作用。

参 考 文 献

- [1] GB/T 1.1—2009 标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写
  - [2] DL/T 600 电力行业标准编写基本规定
  - [3] IEC 61362 水轮机调节系统技术规范导则
  - [4] IEEE Std 1207 水轮发电机组水轮机调速系统应用导则
  - [5] 西电监办〔2011〕118号 西北区域发电厂并网运行管理实施细则（试行）
-