

水轮机调节

东北水利水电学校主编

电力工业出版社

12
21; 1

水 轮 机 调 节

东北水利水电学校主编

电力工业出版社

水 轮 机 调 节

东北水利水电学校主编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16.75印张 377千字 1插页

1981年12月第一版 1981年12月北京第一次印刷

印数 0001—7150册 定价 1.40元

书号 15036·4246

内 容 提 要

全书共分八章。主要内容有水轮机调节的基本知识，机械和电气液压调速器的结构与特性，水轮机调速器的调整试验，调速器的运行与常见故障的分析与处理，调节保证计算和调速器选择，以及油压装置的结构与工作原理和调节对象动态特性简介。

本书可作为中等专业学校“水电站动力设备”专业教材，也可供从事水轮机调速器安装、检修和运行的技术工人及有关技术人员参考。

前 言

本书重点讲述水轮机调节的基本知识，调速器（机调与电调）及其主要元件的结构原理与工作特性，调速器的调整试验，油压装置及其附件的工作原理与调试，调节保证计算与调速器设备选择的方法。对调节对象的特性系数，水轮机调节的动态特性，调速器的运行与常见故障分析等也作了一般的介绍。

本书的取材主要着眼于调速器的基础知识、结构原理、基本计算和现场调试等内容。编写过程中，注意吸收了国内多年来在科研、设计、安装和运行中的一些实践经验。

本书共分八章，东北水利水电学校田毅同志任主编，并编写第一、二、四、五、八章；成都水力发电学校熊道树同志主审，并编写第六章；湖北水利学校张维强同志编写第三章和第五章的第八节；黑龙江水利工程学校钮平南同志编写第七章。参加审稿的有成都水力发电学校、东北水利水电学校、湖北水利学校、黑龙江水利工程学校、贵州水利水电学校、云南电力学校、四川水利水电学校、东方电机厂、成都水电勘测设计院、映秀湾水力发电厂等单位。

本书在编写过程中得到李培深、郭中枹、寿梅华、常兆堂、吴应文、陈嘉谋、孙邦彦等同志的关怀，并对书稿有关部分提出了宝贵的意见，在此表示衷心感谢。

编者的水平和经验有限，书中不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

一九八一年二月

目 录

前 言

第一章 水轮机调节的基本知识	1
第一节 水轮机调节的任务和特点	1
第二节 水轮机调节的途径和方法	2
第三节 单一调节机构的调速器	9
第四节 双重调节机构的调速器	19
第五节 调速器的放大和随动系统	25
复习思考题	27
第二章 机械液压调速器的结构与特性	29
第一节 机械液压调速器的原理	29
第二节 测速元件——离心摆	34
第三节 放大元件	43
第四节 反馈元件	62
第五节 双重调节调速器的专用机构与工作原理	73
第六节 调速系统环节间的联结件	77
第七节 调速器的控制机构	78
第八节 调速器与机组静特性	85
复习思考题	89
第三章 电气液压调速器的结构与特性	91
第一节 概述	91
第二节 测频回路	93
第三节 调节信号放大回路	105
第四节 电液调速器的位移传感器	108
第五节 功率给定与硬反馈回路	109
第六节 软反馈回路	113
第七节 信号综合回路	117
第八节 人工失灵回路	119
第九节 电气开度限制回路	120
第十节 双调的电气协联回路	122
第十一节 成组调节的基本原理	128
第十二节 电源供给回路	132
第十三节 电液转换器	134
第十四节 电气液压调速器的工作原理	138
复习思考题	143
第四章 调节对象的特性系数和动态特性	146
第一节 调节对象的特性系数	146

第二节	影响动态特性的主要参数与选择	151
第三节	水轮机调节的动态特性	152
	复习思考题	154
第五章	水轮机调速器的调整与试验	155
第一节	概述	155
第二节	调试前的校验与调整	156
第三节	离心摆的静特性试验	159
第四节	缓冲器特性试验	163
第五节	调速器静特性与双调随动系统不准确度试验	167
第六节	暂态转差系数和速调工作范围的测试以及调速系统死行程测定	172
第七节	启动装置调整试验和紧急停机电磁阀的试验	175
第八节	电调的电气装置静特性试验	177
第九节	机组启动的调试与观测	184
第十节	空载试验	185
第十一节	带负荷试验	188
第十二节	甩负荷试验	191
	复习思考题	194
第六章	油压装置	196
第一节	概述	196
第二节	油压装置的组成及其工作原理	197
第三节	压力油罐容积的计算	199
第四节	油泵	203
第五节	主要附件的结构和工作原理	206
第六节	集油箱	211
第七节	油压装置的试验调整	212
	复习思考题	214
第七章	调节保证计算及调速器选择	215
第一节	调节保证计算的目的和意义	215
第二节	水锤压力计算	216
第三节	转速变化计算	227
第四节	减小水锤压力的措施	232
第五节	水轮机调节保证计算的任务和标准	238
第六节	水轮机调节保证计算的步骤和方法	240
第七节	调速器选择	244
	复习思考题	248
第八章	调速器的运行和常见故障的分析与处理	250
第一节	调速器的运行	250
第二节	调速器常见故障的分析与处理	255
	复习思考题	259

第一章 水轮机调节的基本知识

第一节 水轮机调节的任务和特点

一、水轮机调节的任务

(一) 电力与电能质量

电力已是人们生活与生产中经常使用的不可缺少的动力。电力的生产直接影响着国民经济的发展。为早日将我国建成社会主义强国，实现社会主义四个现代化，电力生产除应提供足够的电量外，还要保证电能的质量，即稳定的电压与频率。电压和频率的偏差不应超过允许的范围。

(二) 水轮机调节的主要目的

国民经济的工农业生产中对供电频率的质量要求是非常严格的。供电频率的质量不合格将会影响生产，甚至造成生产的重大损失。例如电力网和主导发电机的频率不稳定，就会使机床加工件的表面不光滑，纺纱的线条与布的表面不均匀，造成次品和废品，甚至使生产无法进行；就会使电气时钟不准确，引起计时的错误；就会间接引起照明灯光的忽明忽暗，影响人们的工作和学习。各类用户对频率波动的允许偏差都有各自的要求，某些重要生产部门，特别是化工、冶炼、国防和医疗等，对用电频率的精度要求更高。我国电力系统规定，频率应严格保持为50赫，允许偏差不得超过 $\pm 0.2\%$ ，电压偏差不得超过 $\pm 10\%$ 。目前，现代化的电力系统已可满足用户电源频率的稳定，频率偏差范围达到 $\pm (0.01 \sim 0.02)\%$ ，电压稳定值也相应地提高了精度。

从发电到用电是由发电机（水力、火力、风力和原子能发电等）输出的功率，经输配电网络，送至不同用户。电网本身既不产生电能也不贮存电能。因此发电机送给用户的电能是随发随用的，发电和用电之间有着相互影响的关系。实践中可知，用户负荷改变要引起电网频率的升高或降低，发电机的频率和转速亦随之变化，这样，供电质量当然受到影响。如果发电机能及时地适应用户负荷变化，调节其输出的功率，使电网频率和发电机转速恢复正常，供电的质量就可得到保证。水轮机的调节就是使参加调节的水轮发电机完成上述的这个任务。

(三) 水轮机调节和它的基本任务

水轮机调节是应用自动调节技术，使水轮机按预定的生产程序和目的完成生产任务。

在电力系统中，用户负荷的增加或减少是经常发生的，从而系统的频率要相应地降低或升高，发电机的频率随之变化。发电机的频率与转速关系为

$$f = \frac{pn}{60}$$

式中 f ——发电机的输出频率；

p ——发电机的磁极对数；

n ——发电机的转速。

因为已制成的发电机的磁极对数 p 是固定不变的，所以发电机的输出频率实际上是随着发电机即水轮发电机组的转速的变化而变化。

为了及时地适应用户负荷的变化，保持电网频率不变，发电机的输出功率就需要相应地进行调节。通常采取的调节方法是利用水轮机调节的自动装置——调速器（机械的或电气的），将发电机感受的转速或频率偏差转换成相应的操作力，以调节水轮机导叶的开度而改变发电机的输出功率。因此，水轮机调节的基本任务就是按照用户负荷变化所引起水轮发电机转速变化或频率变化的偏差，通过调速器自动调节水轮机导叶开度，使发电机的输出功率和频率满足用户的要求。

电压的稳定是由发电机的励磁调节去解决的，这里不予多述。但须指出，在一般情况下，频率变化 1% 可引起电压变化 1~2%，而电压的变化也会引起频率的不稳定，所以励磁系统的故障也往往导致水轮机调节的工况变坏。

二、水轮机调节的特点

水轮机调节是随着电力生产和自动调节理论的发展而逐步形成的一门科学。水轮机的调节除具有一般自动调节的特征外，还具有如下的特点。

（1）由于水轮机做功需要通过大量的水流，与同样功率的汽轮机相比，其所需的工作能力要大得多，所以水轮机调速器通常有大功率的多级放大元件并要外加能源。

（2）由于水流存在着较大的水流惯性，这种惯性不仅阻止调节中需要的水流速度的迅速改变，而且在过水系统中引起水锤效应，产生与调节相反的作用，从而恶化调节过程，使水轮机调节变得较为复杂。所以现代水轮机的调速器均设有增强稳定的校正元件（通称缓冲器），水轮机出力迅速变化时，缓冲器可减缓导叶开度的变化速度，以提高调节的稳定性。

（3）由于调节对象——水轮机的型式较多，除混流式、定桨轴流式和定桨贯流式水轮机各设有一套调节（导叶）机构外，转桨式和冲击式水轮机还应设有两套调节（导叶和轮叶或偏流板）机构。所以有的水轮机调速器要有双重调节的能力。

（4）由于电力系统和水电厂自动化程度的不断提高，水轮机调速器应具有多种自动操作和控制的能力，所以水轮机调速器将会发展为水电厂中重要的综合自动调节装置。

第二节 水轮机调节的途径和方法

一、水轮机出力及其调节的途径

水轮机的出力是以一定重量的水，从一定高度落下经引水道推动水轮机旋转，把水的能量变成机械能来表示的。通过主轴，发电机将机械能变成电能。水的重量与其下落高度是计算水轮机出力的基本因素。

水力发电站的上游和下游水位差减去引水和排水过程能量的损失就是可利用的水头，也称为水轮机工作水头或有效水头 H （米）。每秒钟通过水轮机的水量称为流量 Q （米³/秒）。水轮机出力 N_x 的计算公式为

$$N_x = \gamma QH$$

考虑到水轮机的水力和机械损失，上式可写成

$$N = \gamma QH\eta \quad (1-1)$$

式中 γ —— 水的比重 (1000公斤/米³)；

Q —— 通过水轮机的流量 (米³/秒)；

H —— 水轮机的工作水头 (米)；

η —— 水轮机的效率 (%)。

式(1-1)中水轮机出力的单位为公斤·米/秒，称为功率。但在工程中水轮机或发电机的出力通常用千瓦作为计算单位。由于1千瓦等于102公斤·米/秒，所以式(1-1)又可写成

$$N = \frac{\gamma QH}{102} \times \eta = \frac{1000Q \cdot H}{102} \times \eta = 9.81QH\eta \quad \text{千瓦} \quad (1-2)$$

按照动力学原理，水轮机旋转时的输出功率应等于其动力矩 M_t 与角速度 ω 的乘积，即

$$N = M_t \omega$$

所以

$$M_t \omega = \frac{\gamma QH\eta}{102} \quad (1-3)$$

而

$$M_t = \frac{\gamma QH}{102\omega} \times \eta \quad (1-4)$$

角速度 ω 与转速 n 的关系为 $n = \frac{30\omega}{\pi}$ 。为了直观和计算方便，常以转速 n 表示角速度 ω 。

从式(1-3)可以看出，水轮机的出力 N （功率）或动力矩 M_t 、角速度 ω 的大小，是由进入水轮机的流量 Q 、水头 H 、水的比重 γ 和水轮机效率 η 来决定的。由于水的比重 γ 和水轮机效率 η 一般可认为固定不变，水头的改变不仅在技术处理上比较困难而且不经济，因此控制水轮机的转速或出力，合理而可行的办法是改变进入水轮机的流量 Q 。水轮机调节的基本途径就是利用调速器控制水轮机导叶的开度以改变进入水轮机的流量。

二、水轮发电机组的能量输入与输出特性

水轮发电机组是由水轮机与发电机连接而成的机组。如图1-1所示，进入水轮机的流量即为机组的输入能量，对主轴产生的转矩即为总力矩 M ，发电机产生的电功率即为机组的输出能量。输入能量对主轴产生总力矩 M 中的绝大部分转换为发电机的输出功率，即机组负荷阻力矩 M_g ；较小部分消耗在机组本身旋转时所产生的阻力矩 M_n （如旋转体动能的增加、摩擦和空气阻力）；还有微小部分消耗在水轮机漏水 and 发电机热损等方面。如果忽略后者，则 $M = M_g + M_n$ 。要使机组的转速 n 升高或者输出功率 P 增大，就需要增加输入能量。反之，要使机组的转速 n 降低或者输出功率 P 减小，就需要减小输入能量。这样就可以实现机组的能量输入与输出的平衡，保持机组的稳定运行。机组的稳定运行是指导叶开度即水轮机的输入能量和发电机功率或负荷都不变时，机组的能量输入与输出是平衡的。如负荷增加，转速就要降低，负荷减少，转速就要升高。又如导叶开度增大时，若负荷不变转速就要升高，负荷增加转速就可不变，或者负荷和转速同时增加。如果导叶开度减

小，若负荷不变转速就要降低，负荷减小转速就可不变，或者二者同时减小。总之，负荷与转速不论如何变化，机组的输入与输出能量之间总是不断地维持平衡。由此可见，转速和负荷，对于水轮机的总力矩 M 而言实际上都是一种平衡力或阻力，一般称为阻力矩。进入水轮机的能量转换成的总力矩 M 减去转速引起的阻力矩 M_n ，所余的力矩叫做水轮机动力矩 M_t ，因此 $M_t = M - M_n$ 。由于 $M = M_g + M_n$ 。所以 $M_t = M_g$ 即水轮机的动力矩与机组负荷阻力矩是相等的。

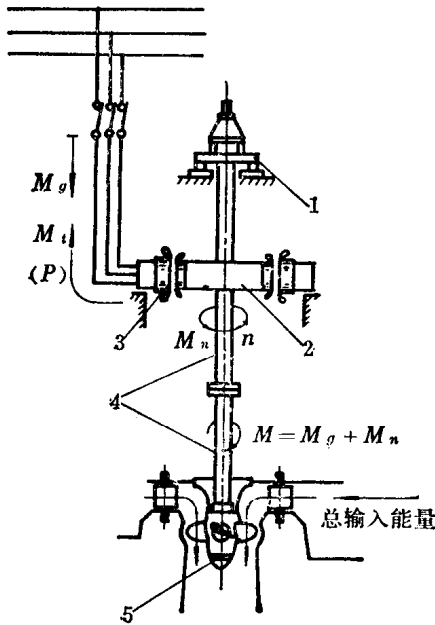


图 1-1 机组能量输入与输出平衡示意图

1—推力轴承；2—发电机转子；3—发电机定子；4—主轴；5—水轮机转轮

入水轮机的能量转换成的总力矩 M 减去转速引起的阻力矩 M_n ，所余的力矩叫做水轮机动力矩 M_t ，因此 $M_t = M - M_n$ 。由于 $M = M_g + M_n$ 。所以 $M_t = M_g$ 即水轮机的动力矩与机组负荷阻力矩是相等的。

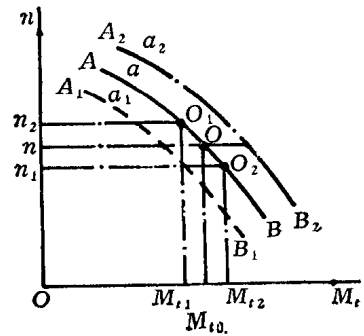


图 1-2 水轮机力矩特性

(一) 水轮机力矩特性

水轮机力矩特性是指水轮机的输入能量不变（导叶开度一定）的情况下，水轮机的转速 n 与水轮机动力矩 M_t 之间的关系，即 $M_t = f(n)$ 。

由于机组转速是由一部分动能转换而来的，所以当导叶开度不变时，如果转速升高，动力矩就减小；转速降低，动力矩就增加。图1-2为水轮机的转速与动力矩的关系曲线。 AB 曲线是导叶开度为 a 时的水轮机转速与动力矩的关系曲线， n 和 M_t 分别表示水轮机的转速和动力矩。如运行的平衡点为 O 、转速和动力矩为 n 和 M_{t0} ，当动力矩从 M_{t0} 增加到 M_{t2} 时，转速就从 n 降低到 n_1 ，运行的平衡点则由 O 点移到 O_2 点。当动力矩从 M_{t0} 减小到 M_{t1} 时，转速就从 n 升高到 n_2 ，运行的平衡点由 O 点移到 O_1 点。这就表明，导叶开度一定，动力矩 M_t 是随转速 n 的增大而减小，或者是随 n 的减小而增大。

图1-2还表明，导叶开度变化时，水轮机力矩特性曲线产生位移，即导叶开度为 a_1 和 a_2 时，对应的力矩特性曲线分别为 A_1B_1 和 A_2B_2 。

(二) 发电机负荷特性

发电机负荷特性是指发电机的外部负荷不变时，发电机的转速 n 与负荷阻力矩 M_g 之间的关系，即 $M_g = f(n)$ 。

发电机外部负荷不变时，发电机负荷阻力矩 M_g 与转速 n 之间的关系，主要决定于负荷的性质。负荷的性质不同，发电机的负荷阻力矩 M_g 有与转速 n 成正比变化的，也有与 n 无关的。但是， M_g 与 n 成正比变化的负荷占绝大多数。所以，当发电机的输出功率不变时，

其负荷阻力矩是随转速的增加而增加，或随转速的减小而减小。图1-3为发电机转速与负荷阻力矩的关系曲线，座标 n 和 M_g 分别表示发电机的转速和负荷阻力矩。 DC 曲线是负荷为 P 时，发电机转速与负荷阻力矩的关系曲线，若发电机运行的平衡点为 O 、转速和负荷阻力矩则分别为 n 和 M_{g0} 。当转速从 n 升高到 n_2 时，负荷阻力矩就从 M_{g0} 增加到 M_{g2} ，运行的平衡点则由 O 点移到 O_2 点。当转速从 n 降低到 n_1 时，负荷阻力矩就从 M_{g0} 减少到 M_{g1} ，运行的平衡点则由 O 点移到 O_1 点。这就表明，发电机输出功率一定时，负荷阻力矩 M_g 是随转速 n 增加而增大，或者是随 n 的减小而减少的。

图1-3还表明，发电机输出功率变化时，负荷特性曲线产生位移，即输出功率为 P_1 和 P_2 时，对应的负荷特性曲线分别为 D_1C_1 和 D_2C_2 。

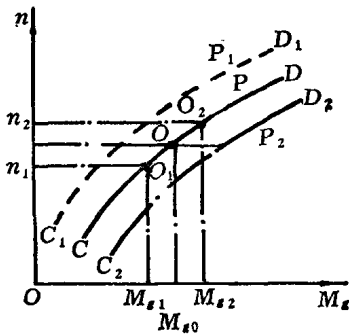


图 1-3 发电机负荷特性

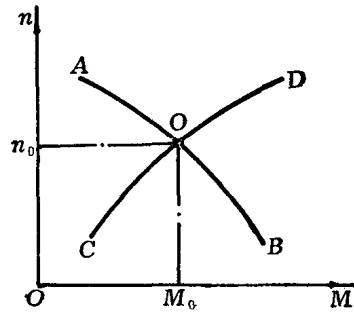


图 1-4 力矩平衡特性曲线

(三) 机组的静特性

机组的静特性，简单的说就是水轮机特性和发电机负荷特性的综合。进入水轮机的流量所产生的总力矩，通过主轴的传递，其中较小部分使机组产生共同的转速 n ，其余部分即为水轮机动力矩 M_t 。 M_t 使发电机产生电功率，此电功率对于主轴产生的阻力，即为发电机的阻力矩或叫负荷阻力矩 M_g 。 M_g 与 M_t 大小相等方向相反。因此，机组在平衡状态下（稳定工况）运行，水轮机和发电机不仅有共同的转速，而且动力矩 M_t 和负荷阻力矩 M_g 必须相等。图1-4所示为力矩平衡特性曲线 $M=f(n)$ ，水轮机动力矩和发电机负荷阻力矩同时等于 M_0 ，即 $M_t=M_g=M_0$ ，水轮机和发电机共同的转速为 n_0 ，运行的平衡点为 O 。这里说明一个重要问题，即机组所以能处于稳定工况下运行，是由诸力矩保持平衡所决定的。按照动力学牛顿第二定律，机组的运动方程式可写为 $J\varepsilon=M_0$ ， ε 为角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ ， M_0 为 M_t 与 M_g 的合力矩。所以

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1-5)$$

式中 J —— 机组转动部分的惯性矩；

ω —— 机组旋转角速度 $(\omega = \frac{\pi n}{30})$ ；

M_t —— 水轮机的动力矩；

M_g —— 发电机的负荷阻力矩。

根据式(1-5)，在水轮机导叶没有调节的情况下，即导叶开度固定水轮机动力矩不变时，可有如下三种情况。

(1) 若动力矩与负荷阻力矩相等，即能量的输出等于输入 ($M_t = M_g$ 或 $M_t - M_g = 0$)，此时

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0$$

由于机组转动部分的惯性矩 J 不等于零，则 $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，这说明机组角速度无变化，机组如图1-5所示在平衡点 O 的稳定工况下运行。

(2) 若动力矩不变而外部用户负荷由 P 减少到 P_1 时，如图1-5所示，发电机负荷静特性曲线 DC 左移到 D_1C_1 位置，合力矩由 M_0 变化到 $M_{0.1}$ ，即能量的输出小于能量的输入 ($M_t > M_g$ 或 $M_t - M_g > 0$)，此时 $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ，说明机组产生角加速度，角速度由 ω_0 增加到 ω_2 ，机组平衡点由 O 移到 O_1 点稳定运行。

(3) 若动力矩不变而外部用户负荷由 P 增加到 P_2 时，如图1-5所示，发电机负荷静特性曲线 DC 右移到 D_2C_2 位置，合力矩由 M_0 变化到 $M_{0.2}$ ，即能量的输出大于输入 ($M_t < M_g$ 或 $M_t - M_g < 0$)，此时 $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ，说明机组产生角减速度，角速度由 ω_0 减小到 ω_1 ，机组平衡点由 O 移到 O_2 点稳定运行。

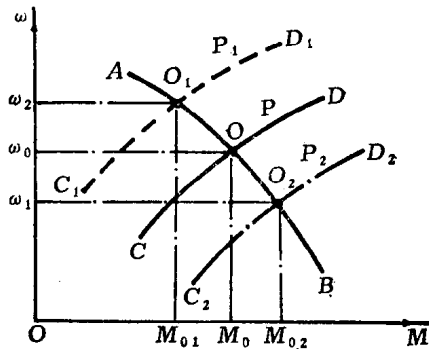


图 1-5 无调节的机组静特性

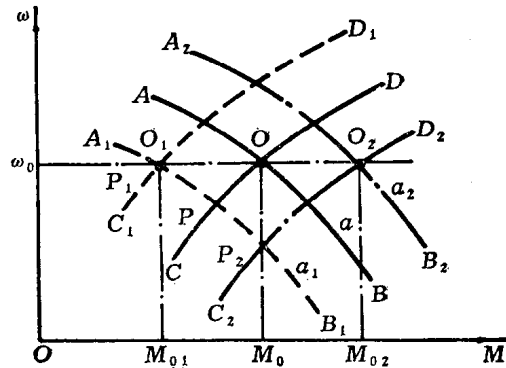


图 1-6 有调节的机组静特性

从上述的三种情况可以看出，水轮机在工作中没有控制机构进行调节，即导叶开度一定时，在输入能量不变的情况下，无论外部负荷如何变化，机组运行的平衡工况点是沿着具有一定斜率的曲线移动，机组转速则与外部负荷的增减成反比变化，即负荷增加转速减小，负荷减小转速增大。当负荷从最大变化到最小时，转速也就从最低变化到最高，从而产生最大的转速偏差，这种偏差值往往超出电能质量的要求，因而是允许的。为了改善这种情况，应使转速偏差为零或小到允许值。所以，一般水轮机都设有控制导叶开度的调节机构，机组负荷变化时，导叶开度能相应地改变，从而使机组转速维持恒定。

水轮机设有改变导叶开度的调节机构时，亦有如下的三种情况。

(1) 外部负荷不变，转速亦不变，导叶开度的调节机构也不动作。机组如图1-6所示的在平衡点 O 稳定运行。

(2) 外部负荷由 P 减小到 P_1 时, 发电机负荷特性曲线 DC 左移。与此同时, 调节机构使导叶开度相应关小, 水轮机力矩特性曲线 AB 亦向左移, 直到与减少负荷后相应的平衡点 O_1 , 保持机组转速不变, 如图1-6所示, 使能量的输入随输出的减小而减小, 即 $M_{t1} = M_{g1} = M_{o1}$ 或 $M_{t1} - M_{g1} = 0$ 。此时 $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 说明机组角速度不变, 只是运行的工况点由 O 点移到了 O_1 点。

(3) 外部负荷由 P 增大到 P_2 时, 发电机负荷特性曲线 DC 右移。与此同时, 调节机构使导叶开度相应开大, 水轮机力矩特性曲线 AB 亦向右移, 直到与增加负荷后相应的平衡点 O_2 , 保持机组转速不变, 如图1-6所示, 使能量的输入随输出的增加而增加, 即 $M_{t2} = M_{g2} = M_{o2}$ 或 $M_{t2} - M_{g2} = 0$ 。此时 $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 说明机组角速度不变, 只是运行的工况点由 O 点移到了 O_2 点。

上述三种情况表明, 设有调节机构的水轮机发电机, 在运行中无论外部负荷如何变化, 都可以使调节前后的转速维持恒定, 转速偏差为零或小到预定的允许值。

调节机构有多种型式, 一般可分为人工调节、半自动调节和自动调节三种。人工或半自动调节的机构多用于农村小型水轮发电机组。大、中型水轮发电机组, 由于工业用电负荷变化迅速而频繁, 电能质量要求高, 依靠人工或半自动调节无法满足要求, 通常都设置自动调速器。

三、各种水轮机流量调节的方式

为了调节进入水轮机的流量, 水轮机在转轮室的外面装设可调节的水门。调节的方式和类型因水轮机的种类和容量大小以及水门种类的不同而不同。

现代大中型水轮机普遍采用多导叶式的水门, 依靠调速器的自动控制, 可以迅速而又准确地进行流量调节。

调节进入水轮机的流量、使发电机的输出功率和频率满足用户对电能质量的要求, 是所有水轮机流量调节的共同目的。但是对于不同类型的水轮机, 流量调节的方式又各有其不同的特征。

(1) 混流式、定桨轴流式和定桨贯流式水轮机采用多导叶式的导水机构, 即靠导叶调节机构调节流量。图1-7所示为混流式的水轮机调节机构。

(2) 转桨式、斜流式水轮机除有调节流量的多导叶调节机构外, 还设有按导叶开度和水头变化而改变轮叶转动角度的调节机构, 这种调节流量的方式可使水轮机按最优效率运行。图1-8所示为转桨式或斜流式水轮机调节机构。这类水轮机有两个调节机构, 并有双重调节的任务。

(3) 冲击式水轮机的调节方式不是利用导叶, 而是利用装设在引水管道末端靠近水

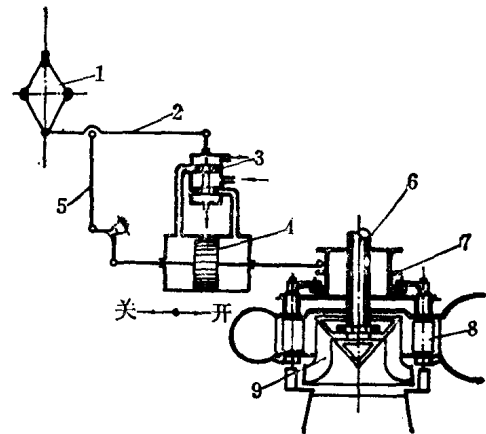


图 1-7 混流式水轮机调节机构

- 1—离心摆; 2—传动杆; 3—配压阀; 4—接
- 力器; 5—反馈杆; 6—主轴; 7—调速环;
- 8—导水叶; 9—水轮机转轮

厚的喷嘴与针阀，以调节冲向水轮机射流的大小。为了防止因水头高和引水管长而在调节中易产生的水锤现象，针阀的移动速度尤其在关闭时不可太快，所以在喷嘴出口处装有可快速改变射流的偏流板，如图1-9所示。当发电机甩掉部分或全部负荷而需要快速调节时，偏流板可迅速地调节射流的流量，喷嘴的针阀便可按规定的速度移动到相当位置，避免产生过大的水锤。这种调节方式同样有两个调节机构，并有双重调节任务。

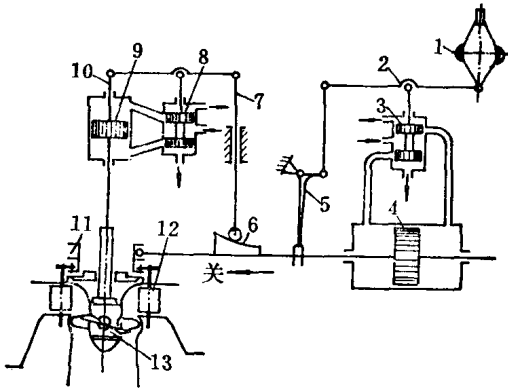


图 1-8 转桨式水轮机调节机构

1—离心摆；2—传动杆；3—导叶配压阀；4—导叶接力器；5—反馈杆；6—协联凸轮；7—传动杆；8—轮叶配压阀；9—轮叶接力器；10—反馈杆；11—调速环；12—导水叶；13—轮叶

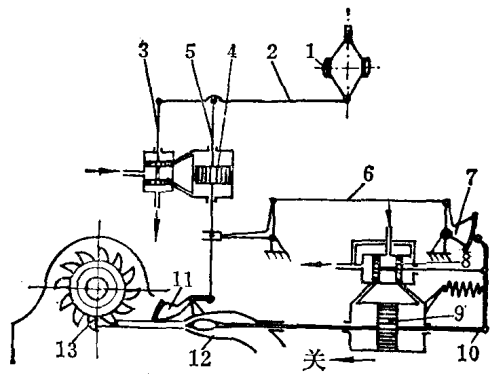


图 1-9 冲击式水轮机调节机构

1—离心摆；2、6—传动杆；3—偏流配压阀；4—偏流接力器；5、10—反馈杆；7—协联凸轮；8—针阀配压阀；9—针阀接力器；11—偏流板；12—针阀；13—水轮机水库

综上所述，不论水轮机的种类、型式如何，按调节机构的数目可分为一个调节机构和两个调节机构的两种调节方式。所以，现代调速器也分为单一调节和双重调节的调速器，简称为“单调”和“双调”。

四、水轮机调节系统的组成和调速器的功用

前面讲过了水轮机调节的任务和调节过程的基本内容。水轮机调节就是通过调速器调节引水系统流量，使水轮发电机转速与出力产生变化。被调节的引水系统、水轮机、发电机叫做调节对象。调速器和调节对象组成调节系统，图1-10所示为水轮机调节系统方框图。

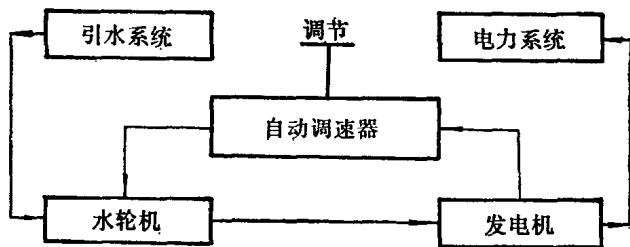


图 1-10 水轮机调节系统方框图

调速器是水轮机调节系统的主导环节。它由自动测量、放大、反馈和执行元件所组成，通常称为调速系统。现代的调速器除应完成上述的基本任务外，还要满足水电厂高度自动化的需要。因此，一台完善的自动调节

水轮机转速的调速器（简称水轮机调速器或调速器），是由实现水轮机调速和有关控制元件及指示仪表等所组成的。现代调速器已发展为有多种功能的综合性自动调速器，它的主要功能如下。

- (1) 机组能自动或手动启动、并列、增减负荷和停机。
- (2) 机组为单机或并列运行时，能自动调整负荷和频率。

(3) 机组并列运行时，自动承担预计的负荷分配，实现经济运行。

(4) 机组在各种运行方式下的自动化或综合自动化中，作为执行环节完成操作或联合控制的任务。

第三节 单一调节机构的调速器

单一调节机构的调速器可以独立地调节水轮发电机组的功率和频率，也是双重调节调速器的主要组成部分。所以，不论“单调”或“双调”的结构如何复杂，只要掌握了单调的基本原理，了解了单一调节机构的调速器，对于其它各种调速器就会是不难理解的。

一、直接作用的调速器

为了由浅入深的理解调速器的基本原理，图1-11示出直接作用的调速器示意图。直接作用是指将离心摆的转动变成机械位移而直接控制水门，改变进入水轮机的流量，从而调节发电机的功率和频率。现将离心摆的基本功用简述如下。

图1-12为简易离心摆的示意图，它由四根联杆1、两个重块2、平衡弹簧3、滑动套4和转轴5所组成。四根联杆铰接成菱形，其上部与转轴顶端接结，下部与滑动套接结，滑动套可沿转轴上下滑动。四联杆铰接点各装有重块2，并由弹簧3与转轴5连结。转动轴旋转时，上述各件都随之转动。转轴转速变化，重块产生的离心力便改变弹簧的拉力，重块向外伸张或向内收缩，带动滑动套沿转轴上下滑动。

按动力学原理，重块旋转所产生的离心力 F 与其质量 m 、旋转半径 r 和角速度 ω 的平方成正比，即 $F \propto m \cdot r \cdot \omega^2$ 。若转轴的旋转角速度为某一定值时，离心摆处于图1-12(a)所示的位置，当转轴转速升高一个 $\Delta\omega$ 时，重块的离心力便增大，并克服弹簧拉力向外伸张，滑动套沿转轴向上移动一个相应的距离 $+h$ ，离心摆处于图1-12(b)所示的位置；当转轴转速降低一个 $\Delta\omega$ 时，重块的离心力便减小，并受弹簧的拉力向内收缩，滑动套沿转轴向下移动一个相应的距离 $-h$ ，离心摆处于图1-12(c)所示的位置。

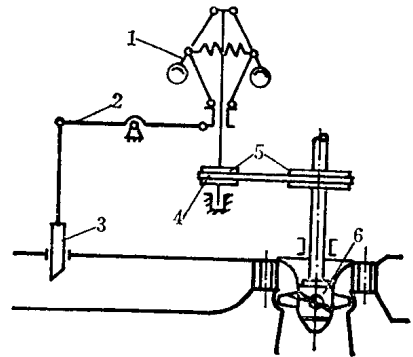


图 1-11 直接作用的调速器示意图
1—离心摆；2—传动杆；3—水门；4—传动带；5—带轮；6—水轮机

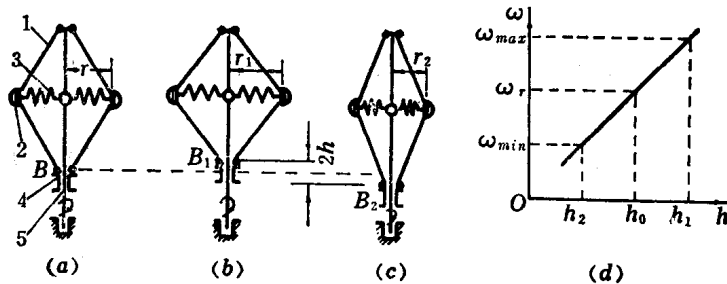


图 1-12 简易离心摆示意图

1—联杆；2—重块；3—平衡弹簧；4—滑动套；5—转轴

上述表明，滑动套的位移是与转轴转速按正比例近于线性关系变化的。图1-12(d)为离心摆的特性曲线。

在了解离心摆的动作原理后，下面可以介绍图1-11所示直接作用的调速器的调节过程。

假如机组在额定的稳定工况下运行，机组带动的离心摆转速亦为额定的旋转运动。额定转速是设计时规定的标准转速，各类机组和调速器的额定转速不完全相同，但某调速器用于一机组时，其额定转速必须与发电机的频率（50赫）相对应。从水门进入水轮机的流量即总输入能量，除消耗于产生额定转速外，如所余能量恰好与发电机输出功率的能量相等，即 $M_t - M_g = 0$ ， $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，机组便保持在额定转速下运行。

当机组功率因外部用户负荷变化而需减少时，由于水门开度还未能及时改变，则 $M_t > M_g$ ， $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ，机组转速便升高，并经传动带4带动的离心摆1的转速也升高，滑动套随之上移，传动杆2绕其中间支点反时针旋转，其左端下移，使水门3的开度减小。这样，进入水轮机的流量就随着外部负荷的减少而减小，重新使 $M_t - M_g = 0$ ， $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，机组就保持在比原来转速较高的新的稳定转速状态下运行。当用户负荷增加时，机组转速降低，水门开度增大，机组保持在比原来转速较低的新的稳定转速状态下运行。

上述过程表明，使用直接作用的调速器，机组调节后的稳定转速要高于或者低于调节前的稳定转速，而且负荷变化越大，调节前后的转速差也越大。机组负荷最大时其转速最小，机组负荷最小时其转速最大，而最大与最小的转速差值一般均大于额定转速的10~12%，这样大的转速差值是现代水轮机调节或电能质量所不允许的。其次，离心摆直接操作水门，由于离心摆有很大的重量与惯性，加上水流也有惯性，往往使流量的改变与负荷的变化不能及时地适应，所以易于引起调节质量的恶化。此外，离心摆重块因受调节质量的限制，不能制造得很笨重，其最大操作力通常都在100公斤以下。基于以上几点原因，离心摆直接操作水门是不能满足一般调速器的要求的，因此实用价值很小。现代化的调速器，包括小型和特小型的调速器均设有液压放大装置。

二、具有放大作用的调速器

有放大作用的调速器，是在离心摆与导叶机构之间增设液压放大装置，如图1-13所示。液压放大装置由配压阀4与接力器5组成，现按图1-14所示将液压放大装置的结构与工作原理简要介绍如下。

配压阀是由封闭式圆筒形金属体壳1和其内部的两个活塞阀盘2所组成，活塞轴杆从体壳上端中间孔伸向外部。两个活塞阀盘将体壳内部分成上、中、下三个腔，中间腔由b孔与压力油连通，体壳的上、下端部与排油管相通。与两个活塞阀盘相对应的体壳壁上a和c两孔，经油管分别与接力器左右腔连通。接力器的体壳4也是圆筒形，其左右侧装有端盖，体壳内装有单圆盘即接力器活塞3，活塞杆从两端盖的中心孔伸到外部，可以驱动导叶机构和调速器的反馈机构。

在配压阀和接力器的内腔以及油管中都充满油的情况下，可对以下三种情况进行分析。