

高等学校统编精品规划教材

# 水轮机自动调节

主 编 程远楚 张江滨  
副主编 陈光大 张德虎



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

中国水力发电工程学会 中国电机工程学会 共同主办

# 水轮机自动调节

主编 王宗培 副主编 王宗培 王宗培  
副主编 王宗培 王宗培 王宗培

中国水利水电出版社

高等学校统编精品规划教材

# 水轮机自动调节

主 编 程远楚 张江滨  
副主编 陈光大 张德虎



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书全面介绍了水轮机调节系统的任务、组成与工作原理,深入分析了水轮机调节系统的工作特性与机组并列运行特性;详细讨论了水轮机微机调速器的硬件结构、工作原理、频率测量方法、控制算法、调节模式与实现方法,介绍了不同型式的液压随动系统与油压装置;建立了水轮机系统各个环节的数学模型;讨论水轮机调节系统的动态特性与分析方法及参数整定,调节保证计算与调速设备选择,水轮机调节系统的调整试验与常见故障分析;引入 MATLAB 及其工具箱,介绍了水轮机调节系统计算机仿真与大波动过渡过程计算。

本书可作为能源动力类与水利水电类专业的本科生教材,也可供其他相关专业和从事水电控制设备研究、设计、制造、安装调试与运行的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水轮机自动调节 / 程远楚, 张江滨主编. — 北京 :  
中国水利水电出版社, 2010. 2  
高等学校统编精品规划教材  
ISBN 978-7-5084-7253-9

I. ①水… II. ①程… ②张… III. ①水轮机—自动  
调节—高等学校—教材 IV. ①TK730.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第026976号

书 名	高等学校统编精品规划教材 <b>水轮机自动调节</b>
作 者	主编 程远楚 张江滨 副主编 陈光大 张德虎
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 20.5印张 486千字
版 次	2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>38.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 序

能源是人类赖以生存的基本条件，人类历史的发展与能源的获取与使用密切相关。人类对能源利用的每一次重大突破，都伴随着科技进步、生产力迅速发展和社会生产方式的革命。随着现代社会与经济的高速发展，人类对能源的需求急剧增长。大量使用化石燃料不仅使有限的能源资源逐渐枯竭，同时给环境造成的污染日趋严重。如何使经济、社会、环境和谐与可持续发展，是全世界面临的共同挑战。

水资源是基础性的自然资源，又是经济性的战略资源，同时也是维持生态环境的决定性因素。水力发电是一种可再生的清洁能源，在电力生产中具有不可替代的重要作用，日益受到世界各国的重视。水电作为第一大清洁能源，提供了全世界 1/5 的电力，目前有 24 个国家依靠水力发电提供国内 90% 的电力，55 个国家水力发电占全国电力的 50% 以上。

我国河流众多，是世界上水力资源最丰富的国家。全国水能资源的理论蕴藏量为 6.94 亿 kW（不含台湾地区），年理论发电量 6.08 万亿 kW·h，技术可开发装机容量 5.42 亿 kW，技术可开发年发电量 2.47 万亿 kW·h，经济可开发装机容量 4.02 亿 kW，经济可开发年发电量 1.75 万亿 kW·h。经过长期的开发建设，到 2008 年全国水电装机总容量达到 17152 万 kW，约占全国总容量的 21.64%；年发电量 5633 亿 kW·h，约占全部发电量的 16.41%。水电已成为我国仅次于煤炭的第二大常规能源。目前，中国水能资源的开发程度为 31.5%，还有巨大的发展潜力。

热能与动力工程专业（水利水电动力工程方向）培养我国水电建设与水能开发的高级工程技术人才，现用教材基本上是 20 世纪 80 年代末、90 年代中期由水利部科教司组织编写的统编教材，已使用多年。近年来随着科学技术和国家水电建设的迅速发展，新技术、新方法在水力发电领域广泛应用，该专业的理论与技术已经发生了巨大的变化，急需组织力量编写和出版新的教材。

2008 年 10 月由西安理工大学、武汉大学、河海大学、华北水利水电学院在北京联合召开了《热能与动力工程专业（水利水电动力工程方向）教材编写会议》，会议决定编写一套适用于专业教学的“高等学校统编精品规划教

材”。新教材的编写，注重继承历届统编教材的经典理论，保证内容的系统性与条理性。新教材将大量吸收新知识、新理论、新技术、新材料在专业领域的应用，努力反映专业与学科前沿的发展趋势，充分体现先进性；新教材强调紧密结合教学实践与需要，合理安排章节次序与内容，改革教材编写方法与版式，具有较强的实用性。希望新教材的出版，对提高热能与动力工程专业（水利水电动力工程方向）人才培养质量、促进专业建设与发展、培养符合时代要求的创新型人才发挥积极的作用。

教育是一个非常复杂的系统工程，教材建设是教育工作关键性的一环，教材编写是一项既清苦又繁重的创造性劳动，好的教材需要编写者广泛的知识 and 长期的实践积累。我们相信通过广大教师的共同努力和不断实践，会不断涌现出新的精品教材，培养出更多更强的高级人才，开拓能源动力学科教育事业新的天地。

教育部能源动力学科教学指导委员会主任委员  
中国工程院院士

2009年11月30日



# 前言

自詹姆斯·瓦特发明蒸汽机离心式调速器以来，水轮机调速器经历了100多年的发展历史。特别是电子技术与计算机技术的采用，使水轮机调速器的实现技术产生了很大的变化；同时也为新的控制理论与方法提供了很好的手段与平台。近20年来，微机调速器已在水电站中得到了广泛的应用。为适应新技术的发展，为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》的精神，加强教材建设，在教育部高等学校能源动力学科教学指导委员会的组织与指导下，新编了本教材。

随着教育体制的改革，近几年高等学校在不断调整和设置新的学科专业，努力拓宽专业口径，适应我国经济建设快速发展对人才的需求，对相关专业课程的教学内容与教学安排作了很大变动。为满足新形势下水利水电类专业和能源动力类专业对水电机组控制课程的需要，本书反映了水电控制设备设计、制造和运行的新技术与新进展，介绍了水轮机控制系统的研究成果。在专业术语和符号定义上除少量沿用习惯外，尽量采用IEC和国家标准规范的定义。

现代水轮机微机调速器可实现各种复杂的控制功能，除完成转速调节外，还可实现开度控制、功率控制、水位控制、流量控制、效率控制、开停机过程控制等功能。现在的调速器与其字面上的“调速”功能已相差甚远。因此，在国际电工委员会IEC 61362—1997《水轮机控制系统规范导则》新的规范中，把原来的“水轮机调速系统”更名为“水轮机控制系统”，我国最新的国家标准GB/T 9652—2007也将原来的“水轮机调速器与油压装置”改为“水轮机控制系统”。但是，“水轮机控制系统”又与“水轮机调节系统”容易发生混淆，所以本教材仍沿用传统的“调速器”名称，它简单明确地表明了“水轮机控制系统”的基本作用就是“调节水轮机转速”，又便于区分、符合习惯。同时，现代水轮机的调节任务又是由控制装置自动完成的。因此，本书定名为“水轮机自动调节”。

本书共9章，第1章介绍了水轮机调节的任务、原理、组成、分类与发展；第2章对水轮机调节系统的工作特性进行了深入分析，并讨论了机组并列运行特性与调节系统的动静态性能指标，还对机械液压型调速器和电气型液

压型调速器作了简单介绍；第3章对水轮机微机调速器的硬件结构、工作原理作了介绍，对水轮机微机调速器的频率测量方法、控制算法、调节模式作了较详细、深入的讨论，并给出了三种不同的实现实例；第4章介绍了不同型式的液压随动系统与油压装置；第5章建立了水轮机系统各个环节的数学模型；第6章介绍了水轮机调节系统的动态特性与分析方法，并对调节系统的参数整定进行了讨论；第7章介绍了调节保证计算的要求、方法与步骤以及调速设备的设计选择；第8章引入 MATLAB 及其工具箱，介绍了水轮机调节系统计算机仿真与大波动过渡过程计算；第9章介绍了水轮机调节系统的调整试验方法，并对常见故障进行了分析与讨论。

本书由程远楚、张江滨任主编，陈光大、张德虎任副主编。参加编写的有西安理工大学张江滨（第1章，第2章，第5章）；武汉大学程远楚（第3章，第9章）；武汉大学曾洪涛（第4章）；武汉大学陈光大（第6章，第8章8.1~8.3节），河海大学张德虎（第7章）；河海大学曹林宁（第8章8.4节）。全书由程远楚统稿，程远楚、张江滨审定。

由于编者水平有限，而水轮机控制系统的理论与技术及设备发展较快，书中错漏或不妥之处，恳请使用本教材的师生和其他读者批评指正。

**编者**

2009年10月



# 目 录

序  
前言

<b>第 1 章 水轮机调节系统基本原理</b> .....	1
1.1 水力发电控制 .....	1
1.2 水轮机调节动作原理 .....	4
1.3 水轮机调节系统组成与特点 .....	8
1.4 调速器的分类与发展 .....	9
<b>第 2 章 水轮机调节系统工作分析</b> .....	14
2.1 调节系统主要元件特性 .....	14
2.2 调节系统特性及动作过程分析 .....	30
2.3 机组并列运行静态分析 .....	36
2.4 调节系统动态与静态特性指标 .....	43
2.5 电气调速器主要环节特性 .....	47
<b>第 3 章 水轮机微机控制技术</b> .....	57
3.1 概述 .....	57
3.2 微机调速器硬件结构与工作原理 .....	65
3.3 微机调速器的频率测量 .....	84
3.4 微机调速器的控制算法 .....	95
3.5 微机调速器的调节模式与控制软件 .....	102
3.6 微机调速器的实现 .....	113
<b>第 4 章 水轮机调速器伺服系统与油压装置</b> .....	129
4.1 液压放大元件 .....	129
4.2 电液转换器伺服系统 .....	137
4.3 电液比例阀伺服系统 .....	141
4.4 电机式伺服系统 .....	143
4.5 电磁换向阀伺服系统 .....	151
4.6 导叶分段关闭装置 .....	153
4.7 事故配压阀 .....	154
4.8 油压装置 .....	156

<b>第 5 章 水轮机调节系统数学模型</b> .....	165
5.1 调速器数学模型 .....	165
5.2 引水系统数学模型.....	171
5.3 水轮机数学模型 .....	174
5.4 发电机负载数学模型.....	180
5.5 水轮发电机组数学模型.....	183
<b>第 6 章 水轮机调节系统动态特性</b> .....	189
6.1 水轮机调节系统动态特性.....	189
6.2 水轮机调节系统分析.....	200
6.3 水轮机调节系统的参数整定 .....	210
<b>第 7 章 调节保证计算及设备选择</b> .....	220
7.1 调节保证计算的任务及标准 .....	220
7.2 水击压力上升计算.....	221
7.3 转速上升计算 .....	227
7.4 改善大波动过渡过程的措施 .....	232
7.5 调节保证计算步骤与实例 .....	235
7.6 调节设备选择设计.....	237
<b>第 8 章 水轮机调节系统计算机仿真</b> .....	243
8.1 MATLAB 及其控制系统工具箱 .....	244
8.2 Simulink 与水轮机调节系统仿真 .....	255
8.3 S-函数及其应用 .....	268
8.4 水轮机调节系统大波动过渡过程仿真 .....	274
<b>第 9 章 水轮机调节系统的试验与故障分析</b> .....	288
9.1 水轮机调节系统的主要试验 .....	288
9.2 微机调速器的整机调整.....	291
9.3 微机调速器的静态特性试验 .....	295
9.4 水轮机调节系统动态特性试验 .....	300
9.5 水轮机调节系统故障分析 .....	306
<b>参考文献</b> .....	316

# 第 1 章

## 水轮机调节系统基本原理

### 1.1 水力发电控制

#### 1.1.1 电能特点与指标

自然界中的能量很少以电能形式稳定存在，因此，人们大量需求的电能只能来源于其他形式的能量（如水能、核能、化学能、热能、风能、太阳能等），电能生产就是指把其他形式的能量转换为电能的过程。

电能是电力企业的产品，由于电能不能大量储存，必然要求电能的生产与消费同时进行，否则将会导致电能的品质指标变化，衡量电能质量优劣主要有频偏差率和电压偏差指标。我国电力系统的标称频率为 50Hz，GB/T 15945—2008《电能质量——电力系统频率偏差》中规定：电力系统正常频率偏差允许值为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，当系统容量较小时，偏差值可放宽为 $\pm 0.5\text{Hz}$ ；在电压方面，GB 12325—2003《电能质量——供电电压允许偏差》中规定：35kV 及以上供电电压正负偏差的绝对值之和不超过额定电压的 10%。10kV 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ，220V 单相供电电压允许偏差为额定电压的 $+7\%$ 、 $-10\%$ 。

频率偏差过大，将会导致以电动机为动力的机床、纺织机械等运转不平稳，造成次品或废品发生。更重要的是频率偏差过大也会影响发电机组及电网自身的稳定运行，甚至造成电网解列或崩溃，因此，保持电力系统频率稳定相当重要；电压过高将会烧毁各种电气设备，电压过低会影响电动机的正常启动，所以维持一定的电压水平是保证电网正常的运行的前提。

除频率偏差和电压偏差指标外，衡量电能质量优劣还有如允许波形畸变率（谐波）、三相电压允许不平衡度以及供电可靠性等指标。

#### 1.1.2 水力发电控制

水力发电是把原来河流中蕴藏的水流能量通过修建大坝或引水工程收集起来（一次开发），然后通过水轮机将水能转变为机械能，再由发电机将机械能转换为电能的过程（二次开发）。安全、优质、高效地完成这个能量转换过程是水电站运行的目标和要求。水电站生产出的电能一般还需要通过输电、配电、供电等环节才能最终送达用户。同时为了提

高供电可靠性和经济性，众多发电机采用并列运行方式，由若干发电厂、升降压变电站、输电线路和大量用户负荷等就构成了庞大的电力网（或称电力系统）。根据能量守恒原理，整个动力系统的能量（水能）输入与能量（电能）消耗应保持平衡。实际上，电力系统的负荷是不断变化的，因此，必须及时调节水轮发电机组的水能输入，以达到动力系统供需平衡。但是，由于电力系统负荷的变化总体上的随机性或不可预测性，必然导致静态供需的不平衡情况发生，从而使系统经常处于动态的平衡过程中，在动态过程中电能的频率和电压均会发生较大波动。为了向用户提供高质量电能，必须对水力发电过程采取高效的控制措施，以尽快减小电能的频率及电压波动并使其趋于额定值。图 1.1 为水力发电过程控制原理图。

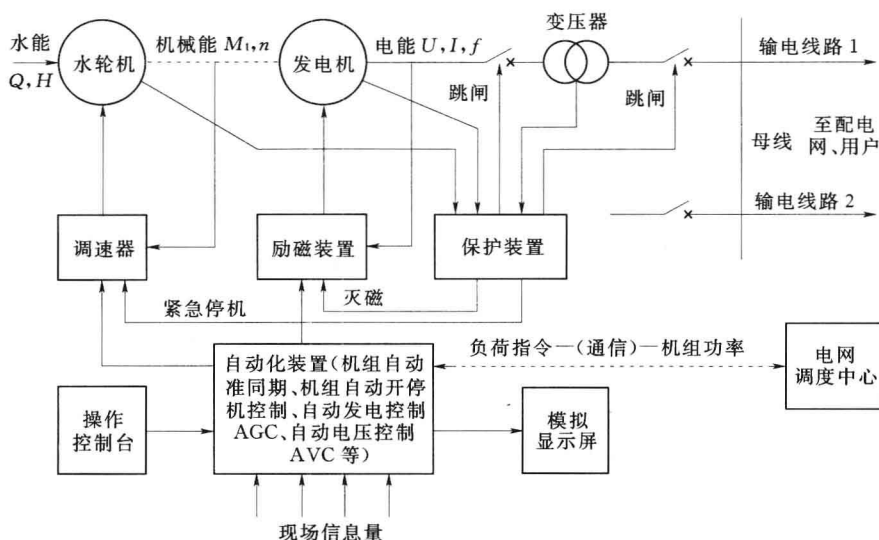


图 1.1 水力发电过程控制原理图

从图 1.1 可以看出，在水力发电过程中，首先将水能通过水轮机转换为旋转的机械能，再经由同步发电机转换为三相交流电能，然后电能通过变电、输电、配电及供电系统送至电力用户消耗。当电力系统有功负荷（电能消耗）发生变化时，必然引起整个系统能量的不平衡，从而引起系统频率发生波动。为了保证电能的频率稳定，必须对水轮发电机组的转速进行控制。水轮机调速器承担着控制机组转速的任务，调速器通过检测机组的转速与给定值比较形成转速偏差，转速偏差信号再经过一定的控制运算形成调节信号，然后通过功率放大操纵导水机构控制水能输入，使水能输入与电力有功负荷相适应。同样，当电力系统电力无功不平衡时，将会引起系统电压发生波动，励磁装置承担着稳定电压的作用，并且励磁系统能够改善并网运行发电机的功角稳定性。

自动化装置是实现高效率水力发电的重要手段。随着计算机及控制技术的迅速发展，机组自动准同期、机组自动开停机控制、自动发电控制 AGC、自动电压控制 AVC 等自动化装置一般均采用微机技术和计算机监控技术实现。而且随着网络通信技术的发展，水电站中的各个机组之间、电力系统中的各个水电站与电力调度中心之间、通过网络通信交换信息十分方便，为实现全网发电自动化创建了良好的基础，从而保证了整个电网高效



运行。

保护装置是安全发电的前提。当机组及系统出现故障或事故时，保护装置直接向调速器发出紧急停机令实现机组紧急停机；当发电机内部出现短路等电气故障时，保护装置向励磁装置发出灭磁令使发电机不再产生电压而烧毁发电机线圈；当变压器或线路等发生故障时，保护装置作用于跳闸以切断电气设备与故障源的电气联系。

### 1.1.3 水轮机转速调节系统地位与作用

水力发电过程控制可分为三个层次，设备层级控制、电站层级控制、电网层级控制。设备（机组）层级控制是水电站的基础控制，直接参与水轮发电机组能量的转换生产过程，控制设备包括调速器、励磁装置、同期装置、保护装置、机组顺控操作装置等，从早期的机械式、电磁电子式发展到目前以微处理器为核心的控制装置，如微机调速器、微机励磁装置、微机同期装置、微机保护装置、微机 PLC 顺控装置等。其中，调速器（水轮机控制系统）和励磁装置（发电机励磁控制系统）是闭环连续控制器，要求具有很高的实时性。

电站（厂）层级控制的主要任务是监视、控制、协调、优化水电站中的各个设备，即由水电站计算机监控系统完成对电站整体经济技术的协调与优化。电厂需要对各种设备运行状况进行监视，建立历史的、实时的数据库，并通过各种算法对设备将来的运行状况进行预测。数据类型包括各种电气量、机械量、水力量参数，在中控室及相应的终端设备上就能了解全厂的状况。大中型电站一般均采用分层分布式计算机控制系统，电站层级向机组层级（LCU 现地单元）发出控制命令，又接受上一级调度部门（电调中心或水调中心）的控制命令，一般采用开环控制方式，即使是闭环控制也对实时性要求不高。协调与优化是电站级控制的一项重要任务，其目的是提高电厂的总体效益，通过对各台机组有功和无功的合理调度、各种资源的合理分配，提高经济效益。自动发电控制（AGC）其主要功能是根据电网调度下达的有功负荷总量，确定机组运行台数、最优启停次序规则和各台机组所带的负荷，每一台机组的运行要受到各种条件限制，如机组在系统中的地位、效率、水轮机振动区、轴承瓦温、上游来水量、下游放水量等因素。自动电压控制（AVC）是整个电力系统电压无功控制的一个组成部分。AVC 通常分两个阶段，先调节发电机励磁或变压器分接头满足电压偏差要求，再在机组间合理分配无功负荷，使线路损耗最小。无功负荷的调整也要受到最小、最大无功功率的限制，可以从  $P-Q$  曲线查得，事先存放在数据库内，供程序调用。

电网（系统）层级控制是指所处电力网的各电站之间的联合调度控制，在保证电网的稳定、安全、可靠的前提下，通过适应的控制方法降低全网各种损耗，提高经济效益。流域梯级电站还存在着水力因素之间联系，一般设有梯级水电站调度中心，对于电网层级控制来说，可将整个流域梯级水电站作为一个整体，负荷指令下达给水调中心，再由水调中心下达到各个水电站，最大限度的利用水能是水库优化调度的目标和任务。

设备（机组）层级控制是整个水力发电过程控制系统的最底层控制，而水轮机转速调节系统又位于机组层级控制的最前端。因此，水轮机调速器作为转速调节系统的控制器，其控制性能就显得尤为重要和关键。早期的机械型调速器只具备单一的调速功能，随着电



气、电子、计算机技术的迅猛发展,电气型、微机型调速器在完成机组调速这一基本任务的基础上功能有较大扩展,特别是微机调速器可实现各种复杂的控制功能,调速器已成为一个智能的多功能综合控制装置,可完成开度控制、功率控制、水位控制、流量控制、效率控制、开停机过程控制等功能。因此,在国际电工委员会 IEC61362-1997《水轮机控制系统规范导则》新的规范中,把原来的“水轮机调速系统”更名为“水轮机控制系统”,我国最新的国家标准 GB/T 9652-2007《水轮机控制系统试验》也将原来的“水轮机调速器与油压装置”改为“水轮机控制系统”。但是,考虑到“水轮机控制系统”与“水轮机调节系统”容易发生混淆,所以本教材仍沿用传统的“调速器”或“调速系统”名称,它简单明确地表明了“水轮机控制系统”的基本作用就是“调节水轮机转速”,便于区分又符合习惯。

## 1.2 水轮机调节动作原理

### 1.2.1 水轮机转速调节的方法

如图 1.2 所示,水轮发电机组转动部分可描述为绕固定轴旋转的刚体运动,其运动方程为

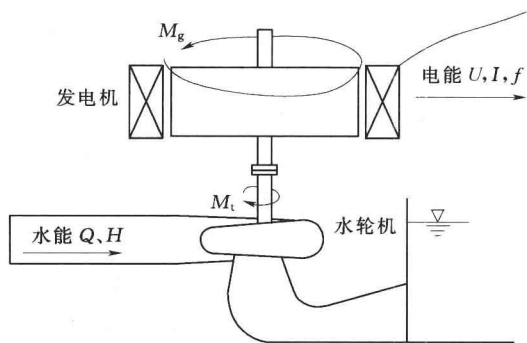


图 1.2 水轮发电机组转速调节原理图

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1.1)$$

式中:  $J$  为机组转动部分转动惯量;  $\omega$  为机组的角速度,  $1/s$ ;  $M_t$  为水轮机的主动力矩;  $M_g$  为发电机阻力矩。

为了讨论问题方便起见,现给出同步发电机角速度  $\omega$ 、转速  $n$  和频率  $f$  之间的关系,  $n = \frac{30}{\pi} \omega$  ( $r/min$ ),  $f = \frac{p}{60} n$ , 三者保持严格的比例关系(未考虑功角摆动),其中,  $p$  为同步发电机的极对数。为了使水轮

发电机组频率保持不变,必须维持机组的转速及角速度为常数,机组的旋转加速度  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , 由式(1.1)可得出:

$$M_t = M_g \quad (1.2)$$

式(1.2)说明,水轮机主动力矩等于发电机阻力矩是维持水轮发电机组转速或频率恒定的必要条件。发电机阻力矩  $M_g$  主要为发电机负荷电流产生的电磁阻力矩  $M_e$ , 还包括轴承、空气等造成的机械摩擦阻力矩。负荷阻力矩与负荷大小和性质有关,随着用电户需求的不同,电力负荷大小经常会发生变化。为了满足式(1.2)条件,水轮机主动力矩必须跟随发电机阻力矩变化而变化,这样才能保证机组转速或频率恒定不变。

水轮机主动力矩由水流作用于转轮叶片而产生,水轮机的主动力矩可由式(1.3)表示。



$$M_t = \frac{P}{\omega} = \frac{\gamma Q H \eta}{\omega} \quad (1.3)$$

式中： $P$  为机组出力，kW； $\gamma$  为水的容重，kN/m<sup>3</sup>； $Q$  为水轮机的流量，m<sup>3</sup>/s； $H$  为水轮机工作水头，m； $\eta$  为水轮机的效率； $M_t$  为水轮机主动力矩，kN·m。

由式 (1.3) 得知，调节水轮机的流量可以改变水轮机的主动力矩，而水轮机的流量可通过改变导叶开度或喷针开度来实现，这种调节水轮机主动力矩方法较其他调节方法简单、有效、易实现。因此，当发电机负荷发生变化时，通过调整水轮机开度改变主动力矩的大小，使其与负载阻力矩相平衡，以维持机组的转速或频率恒定。

由于发电机的负荷是随机变化的，根据负荷变化来调整水轮机的主动力矩很难实现，而且影响水轮机的主动力矩不等于发电机的阻力矩的因素很多，可能是水轮机水头发生变化，也可能是水轮机效率发生变化，还可能是机械摩擦力发生变化等。由式 (1.1) 及式 (1.3) 可知，当水轮机的主动力矩大于发电机的阻力矩时，机组转速就会升高，应减小水轮机的流量或开度；当水轮机的主动力矩小于发电机的阻力矩时，机组转速就会下降，应增大水轮机的流量或开度。所以，根据机组转速变化来调整水轮机流量输入及主动力矩输出，以维持机组的转速或频率在规定的范围之内，这就是水轮机转速调节的方法。

由于利用转速变化来调整水轮发电机组的有功输出，从理论上来说不可能做到保持机组转速恒定不变，只能希望转速变化尽可能的小，动态过程尽可能的短，这就需要寻找有效的调节手段或先进的控制策略。

### 1.2.2 水轮机转速人工调节

人工调节转速时，需要先装设一转速表，以便于运行人员监视机组转速。当负荷变化引起转速变化时，运行人员根据转速表显示值与脑中记忆的给定值进行比较分析，然后通过机械传动机构控制开大或关小导叶开度，经过一段时间的反复调节，机组转速重新稳定在给定值附近，达到新的平衡状态。需要指出的是：人工调节机组转速动态过程时间的长短、转速波动的大小、波动的次数取决于运行人员的经验和水平，对于操作不熟练的运行人员，可能导致转速调节过程不稳定情况发生。图 1.3 为机组转速人工调节示意图。

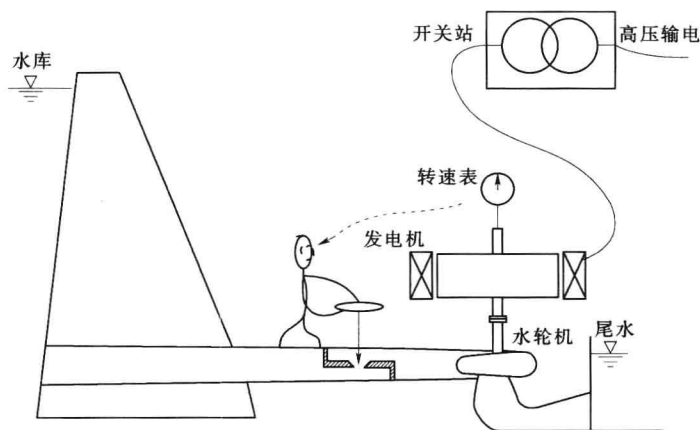


图 1.3 水轮机转速人工调节示意图



### 1.2.3 水轮机转速自动调节

人工调节只适用于早期很小容量的机组，现代水轮发电机组一般均装设自动调节器，代替运行人员自动调节水轮机转速，如图 1.4 为水轮机转速自动调节系统示意图。

当机组负荷增加时，发电机的负载力矩  $M_g$  大于水轮机的主动力矩  $M_t$ ，机组转速下降，通过传动机构带动离心飞摆旋转，飞摆离心力减小带动 A 点下移，K 点未动，B 点也下移，配压阀阀芯向下移动，压力油进入接力器下侧油管路，接力器上侧油管路接通回油，接力器活塞在油压力的作用下向上移动，Y 点上移，开大水轮机的导叶开度，水轮机流量增加，使水轮机的主动力矩  $M_t$  增加，从而抑制了机组转速下降，当主动力矩  $M_t$  增大到大于负载力矩  $M_g$  后，机组转速开始上升。经过一段时间的反复调节，机组转速重新稳定在给定值，将达到一个新的平衡状态；当机组负荷减少时，发电机的负载力矩  $M_g$  小于水轮机的主动力矩  $M_t$ ，机组转速上升，飞摆离心力增大带动 A 点上移，K 点未动，B 点也上移，配压阀阀芯向上移动，压力油进入接力器上侧油管路，接力器下侧油管路接通回油，接力器活塞在油压力的作用下向下移动，Y 点下移，关小水轮机的导叶开度，水轮机流量减小，使水轮机的主动力矩  $M_t$  减小，从而抑制了机组转速上升。通过一段时间的调节，最后也将达到一个新的平衡状态。图 1.4 中缓冲器是把接力器位移反馈到输入端，能够改变接力器的运动规律，是保证调节系统动态过程稳定的关键元件。实际上，由于电力系统负荷是不断变化的，因而转速调节过程也在不断进行。调整转速给定把手可改变机组转速稳态值。

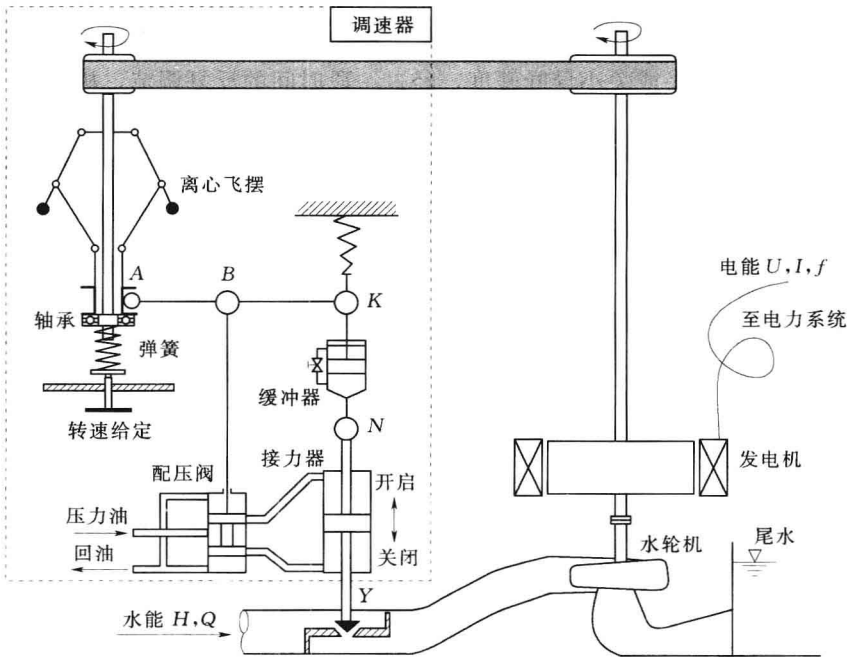


图 1.4 水轮机转速自动调节系统示意图

## 1.2.4 双调节调速器的动作原理

转桨式水轮机除导叶需要控制外，桨叶也需要控制，要求桨叶开度  $\varphi$  与导叶开度  $\alpha$  在一定水头  $H$  下保持给定的协联关系，水轮机的桨叶开度是导叶开度和水头二元函数，即  $\varphi=f(\alpha, H)$ ，这样才能使转桨式水轮机始终处于高效率区运行。在调节系统动作过程中，水轮机流量主要由导叶开度控制，桨叶开度以很慢的速度按协联关系跟随导叶开度变化，基本上不参与水轮机转速的调节过程。图 1.5 为转桨式水轮机调速器动作原理图，图中未画出调速器的导叶控制部分。

在图 1.5 中，转桨式水轮机协联关系曲线是由协联凸轮完成的，协联凸轮的转角代表导叶开度  $\alpha$ ，协联凸轮沿轴线平移距离代表水头  $H$ ，协联凸轮的半径代表桨叶开度  $\varphi$ 。协联凸轮顺时针转动，协联凸轮的半径增加；协联凸轮逆时针转动，协联凸轮的半径减少。水头升高时，水头装置驱动协联凸轮向左移动，协联凸轮的半径增加；水头下降时，水头装置驱动协联凸轮向右移动，协联凸轮的半径减小。设导叶接力器向关闭方向运动，斜块向右带动滚轮 A 向上运动，拐臂带动协联凸轮逆时针旋转，滚轮 B 到协联凸轮轴线距离缩短，B 点下移，C 点也下移，此时 E 点未动，则 D 点下移，配压阀右侧下面油路接通压力油，配压阀右侧上面油路接通回油，桨叶接力器向上运动，通过传动机构带动关小桨叶转角。与此同时 E 点上移，使 D 点上移，配压阀阀芯回中，桨叶接力器停止运动，D 点又回到原来位置。稳定后，E 点上移距离与 B 点或 C 点下移距离成比例关系，保证了水轮机桨叶开度与导叶开度保持协联工作。

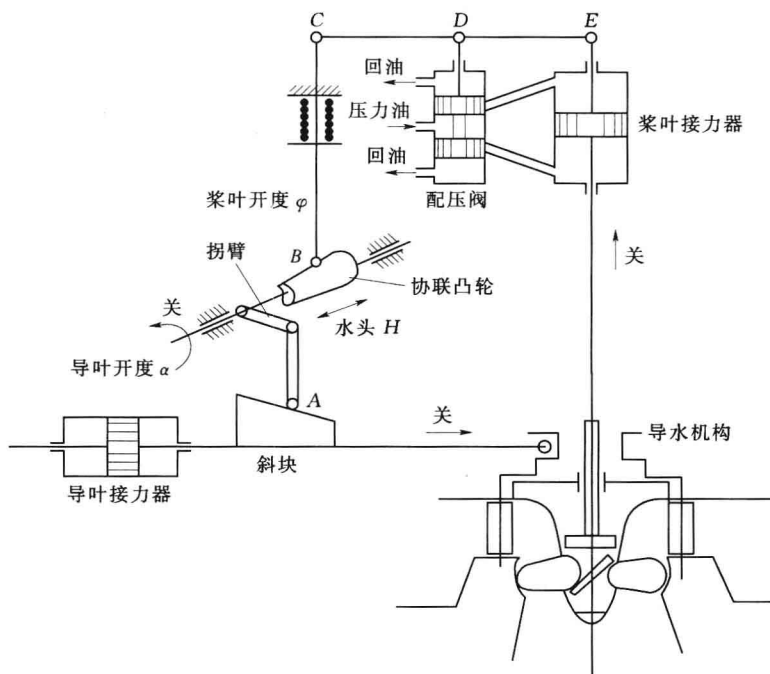


图 1.5 转桨式水轮机调速器动作原理图