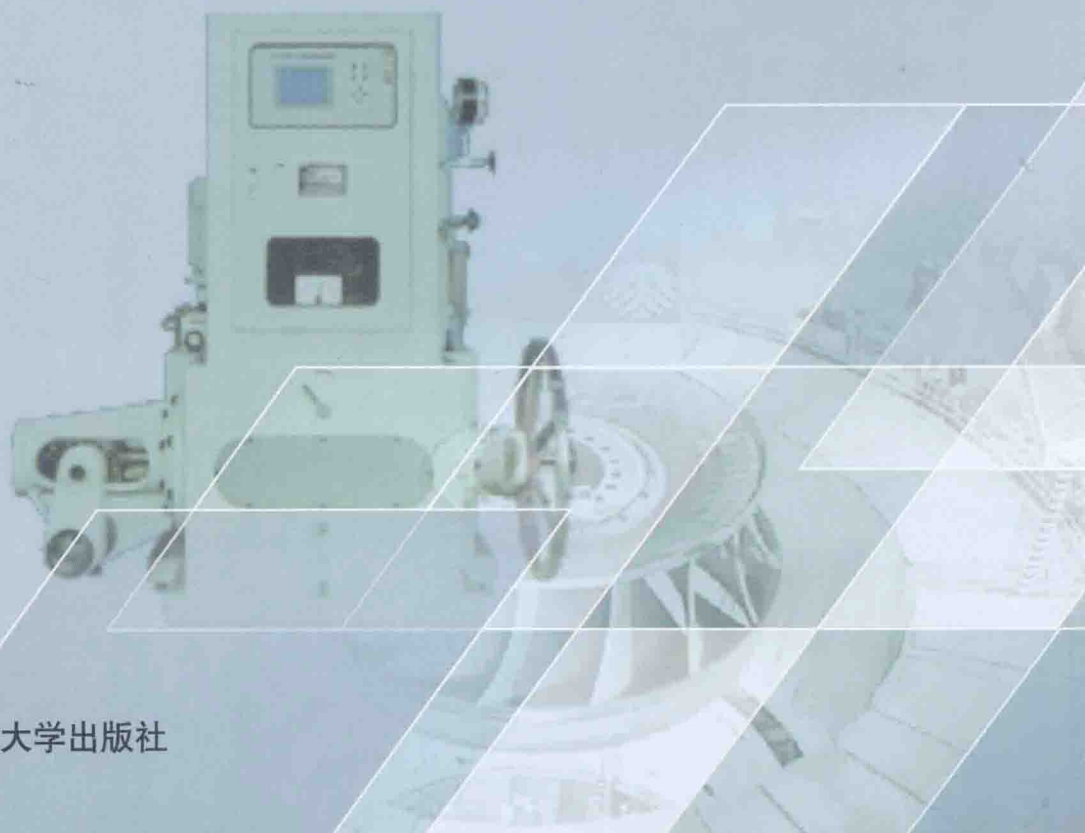


· 四川大学精品立项教材 ·

水轮机调节系统

S HUILUNJI TIAOJIE XITONG

主编 张昌兵



四川大学出版社

· 四川大学精品立项教材 ·

水轮机调节系统

S HUILUNJI TIAOJIE XITONG

主编 张昌兵



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:蒋 琦
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

水轮机调节系统 / 张昌兵主编. —成都:四川大学出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-5614-8423-4

I. ①水… II. ①张… III. ①水轮机—调节系统—高等学校—教材 IV. ①TK730.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 053526 号

书名 水轮机调节系统

主 编 张昌兵
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-8423-4
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 16
字 数 408 千字
版 次 2015 年 4 月第 1 版
印 次 2015 年 4 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科联系。
电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:<http://www.scup.cn>

版权所有◆侵权必究

前 言

全书共分 6 章。第 1 章介绍了水轮机调节系统的任务与特点、工作原理、特性以及调速器分类；第 2 章介绍了机械液压型调速器的结构与组成、工作原理以及数学模型；第 3 章介绍了微机调速器的硬件组成、控制算法以及软件原理；第 4 章介绍了水轮机调节系统的数学模型、动态特性、稳定性、参数整定以及计算机仿真分析；第 5 章介绍了调节保证计算的压力上升、转速上升、调节设备选型以及改善大波动过渡过程的措施；第 6 章介绍了调速器的调整试验。

本书既适合于初次接触水轮机调节系统的本科学生，也可作为从事水轮机调节系统设计、制造、安装调试和运行等技术人员的参考用书。根据调速技术的发展，结合初学者的特点，本书保留并简要地介绍了机械液压型调速器的结构、工作原理，删除了模拟电气液压型调速器的内容，详细介绍了微机调速器的结构与工作原理。

在编写本书过程中，作者参考并引用了大量文献资料与研究成果，在此谨向相关专家、学者表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免出现错误和不当之处，诚请读者批评指正。

编 者

2014 年 10 月

目 录

第 1 章 水轮机调节系统的基本概念	(1)
第 1 节 水轮机调节系统的任务与特点	(1)
第 2 节 调速器型号、结构及分类	(4)
第 3 节 水轮机调节系统的工作原理	(8)
第 4 节 水轮机调节系统的特性	(17)
第 5 节 机组并列工作的静态分析	(21)
复习思考题	(25)
第 2 章 机械液压型调速器	(27)
第 1 节 测速环节	(27)
第 2 节 液压放大装置	(35)
第 3 节 暂态反馈环节	(48)
第 4 节 永态反馈环节	(53)
第 5 节 油压装置	(55)
第 6 节 机械液压型调速器工作原理	(63)
第 7 节 机械液压型调速器数学模型	(69)
复习思考题	(76)
第 3 章 微机调速器	(78)
第 1 节 微机调速器概述	(78)
第 2 节 微机调速器总体结构	(79)
第 3 节 微机调速器的输入输出通道	(86)
第 4 节 微机调速器的测频原理	(93)
第 5 节 WDT 型微机调速器的硬件系统	(100)
第 6 节 微机调节器的控制算法	(109)
第 7 节 微机调速器的软件系统	(112)
第 8 节 PLC 微机调速器的硬件原理	(124)
第 9 节 PLC 微机调速器软件	(137)
复习思考题	(154)
第 4 章 水轮机调节系统动态特性	(155)
第 1 节 调速器的数学模型	(155)
第 2 节 调速器的动态特性	(161)
第 3 节 调节对象的动态特性	(168)
第 4 节 水轮机调节系统的动态特性	(180)

第5节 水轮机调节系统的稳定性·····	(188)
第6节 水轮机调节系统的参数整定·····	(193)
第7节 水轮机调节系统计算机仿真·····	(198)
复习思考题·····	(204)
第5章 调节保证计算 ·····	(205)
第1节 调节保证计算的任务与标准·····	(205)
第2节 水击压力计算·····	(206)
第3节 转速升高计算·····	(214)
第4节 调节保证的计算步骤与举例·····	(220)
第5节 调速设备选型·····	(224)
第6节 改善大波动过渡过程的措施·····	(228)
复习思考题·····	(230)
第6章 调速器的调整试验 ·····	(232)
第1节 调节参数选择·····	(232)
第2节 试验装置与标准·····	(234)
第3节 调速系统的调整试验·····	(234)
第4节 一元线性回归分析法·····	(245)
复习思考题·····	(247)
参考文献 ·····	(249)

第 1 章 水轮机调节系统的基本概念

第 1 节 水轮机调节系统的任务与特点

§ 1.1.1 水轮机调节系统的任务

水轮发电机组能够把水能变成电能，供给用户使用。用户除了要求供电安全可靠外，还要求电能的频率及电压能够保持在额定值附近的某一范围内，如果频率偏离额定值过大，就会影响用户的产品质量。我国电力系统规定：频率应保持在 50 Hz，其偏差不得超过 ± 0.5 Hz，对大容量系统不得超过 ± 0.2 Hz。

电力系统的频率稳定主要取决于系统内有功功率的平衡。然而，电力系统的负荷是不断变化的，存在着变化周期为几秒至几十分的负荷波动，其幅值可达系统总容量的 2%~3%（在小系统或孤立系统负荷变化可能更大），而且是不可预见的。此外，一天之内系统负荷有上午、下午两个高峰和中午、深夜两个低谷，这种负荷变化是可以预见的，但其变化速度不可预见。电力系统负荷的不断变化必然导致系统频率的变化。

根据《电机学》可知：发电机发出的交流电压的频率与发电机组转速之间的关系可用下式表示：

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-1)$$

式中： f 为发电机输出交流电压的频率，Hz； p 为发电机的磁极对数； n 为发电机的转速，r/min。

由 (1-1) 式可知，发电机的磁极对数 p 是不变的，频率 f 与发电机转速 n 成正比。也就是说，水轮发电机在运转中输出电压的频率实际只是随水轮发电机组转速的增减而增减。因此，根据电网负荷的变化不断调节水轮发电机组的有功功率输出，并维持机组频率（转速）在规定的范围内，这就是水轮机调节系统的基本任务。

如图 1-1 所示，水轮发电机组的运动方程可按刚体绕固定轴转动的微分方程表示为：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1-2)$$

式中： J 为机组转动部分的转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ； ω 为机组角速度，rad/s； M_t 为水轮机主动力矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； M_g 为发电机电阻力矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

水轮机主动力矩是水轮机工作水头 H 、导叶开度 a （流量 Q ）以及机组转速 n 等的

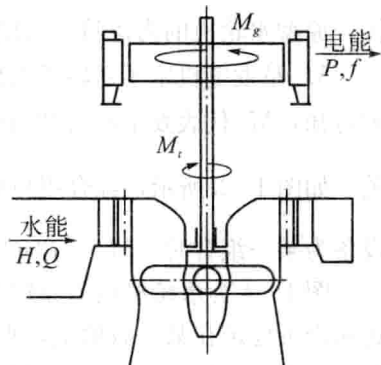


图 1-1 水轮发电机组示意图

函数。图 1-2 是水轮机单位力矩特性曲线，它可由综合特性曲线换算或试验数据求得：

$$M'_1 = \frac{KQ'_1\eta_m}{n'_1} \quad (1-3)$$

式中： M'_1 为单位力矩， $N \cdot m$ ； n'_1 为单位转速， r/min ； Q'_1 为单位流量， m^3/s ； η_m 为模型效率； K 为系数，约等于 93735。

于是，原型水轮机主动力矩可由下式计算：

$$M_t = \frac{M'_1 D_1^3 H \eta_p}{\eta_m} \quad (1-4)$$

式中： D_1 为水轮机标称直径， m ； H 为水头， m ； η_p 为原型水轮机效率。

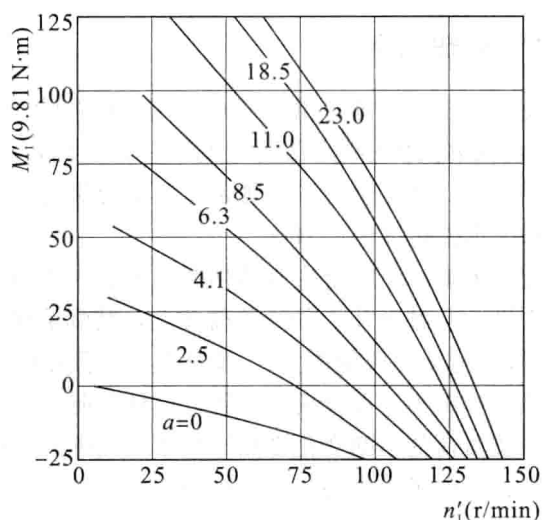


图 1-2 水轮机单位力矩特性曲线

由图 1-2 可见，当导叶开度一定时，单位力矩随转速增加而减小，即 $\frac{dM'_1}{dn'_1} < 0$ ；当转速一定时，单位力矩随导叶开度增加而增加，水轮机的这一特性称为水轮机的自调节特性。原型水轮机的力矩特性与模型单位力矩特性相似。

M_g 是发电机定子对转子的作用力矩，它的方向与转向相反，是阻力矩。由发电机原理可知， M_g 代表发电机有功功率输出，即与用户耗电功率的大小有关，与用户的性质有关。如图 1-3 所示，综合用户后的 M_g 一般是随转速增加而增加的，即 $\frac{dM_g}{dn} > 0$ ，当用电设备为某一组合时， $M_g = f(n)$ 可用一条曲线表示。

图 1-4 为水轮机调节原理图。由图可知，当系统负荷变化后，导叶开度不变，机组转速仍可稳定在某一数值上，水轮机及负荷的这种能力称为自平衡能力。但仅仅依靠它来保持转速是不行的，因为此时的转速将远远偏离额定值，不能满足系统频率偏差的要求。如需满足系统频率的要求，需要相应改变导叶开度。当系统负荷减少，阻力矩由 $f_2(n)$ 变到 $f_3(n)$ 时，只需把导叶开度减小到 a_3 ，机组转速将维持在 n_0 ；当系统负荷增加时，相应开启导叶开度至 a_c ，也能维持转速不变。

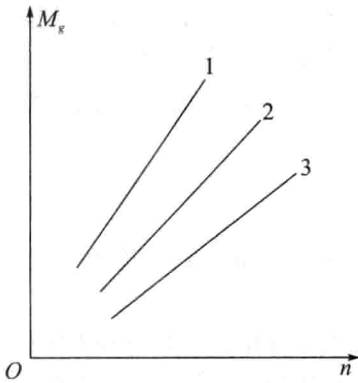


图 1-3 负荷阻力矩特性曲线

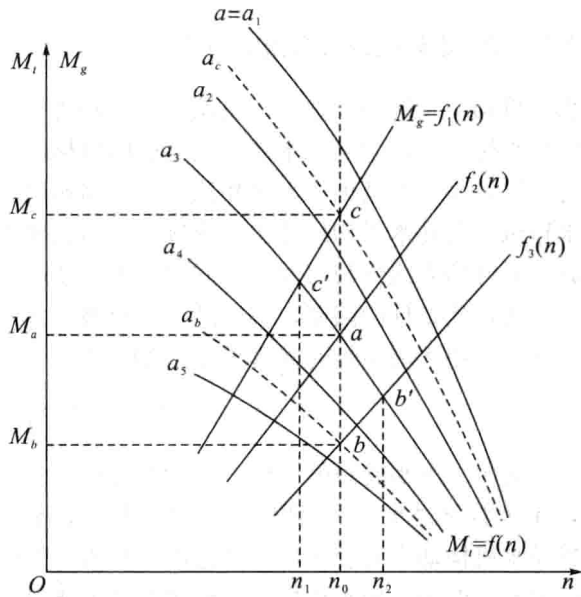


图 1-4 水轮机调节原理图

系统负荷的改变可相应改变导水机构（或喷嘴浆叶）的开度，以使水轮发电机组的转速维持在某一预定值，或按某一预定的规律变化，这一过程就是水轮发电机组的转速调节，也称为水轮机的一次调频。而这一过程是靠具有自动调节功能的调速器来实现的。调速器通常由测量、综合、放大、执行和反馈等元件组成，机组是被调节的对象。调速器与机组构成了水轮机调节系统。它们的互相关系可以用图 1-5 表示。机组的转速信号送至测量元件，测量元件把转速信号转化成位移或电压信号，然后送至综合放大环节与给定信号相比较，确定转速偏差的大小和方向，并根据偏差情况生成调节信号，调节信号被放大后，送到执行元件推动导水机构，反馈元件又把导叶开度变化的信息反馈回综合放大环节，使转速偏差较小时不至于频繁进行调节。

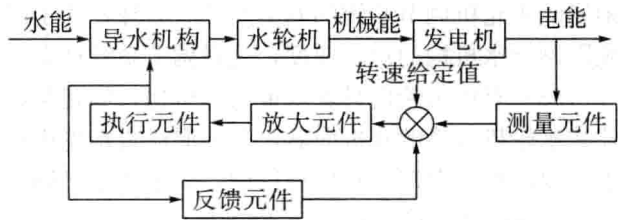


图 1-5 自动调节方块图

水轮机调节系统除了承担上述的基本任务外，还担负了如下任务：

- (1) 进行机组的正常操作。机组的开、停机，增、减负荷，以及发电、调相等各种工况的相互切换。
- (2) 保证机组的安全运行。在各种事故情况下，机组甩掉全部负荷后，调速系统应能保证机组迅速稳定在空载或者根据指令信号可靠地紧急停机。
- (3) 实现机组的经济运行。按要求自动分配机组间的负荷。
- (4) 调速器与其他装置配合，完成自动发电控制（AGC）、机组成组控制、按水头调节等。

§ 1.1.2 水轮机调节系统的特点

水轮机调节系统与其他原动机调节系统相比有如下特点:

(1) 水轮发电机组是把水能变成电能的机械,而水能受自然条件的限制,单位水体所具有的能量较小,与其他原动机相比,要发出相同的电功率,就需要通过较大的流量。因此,水轮机及其导水机构尺寸也相应较大。这就要求调速系统设置多级液压放大元件,而液压放大元件的非线性与时间滞后问题有可能使水轮机调节系统的调节品质恶化。

(2) 受自然条件的限制,水电站往往有较长的压力引水管道,管道长,水流惯性大。水流惯性可以用水流惯性时间常数 T_w 来描述:

$$T_w = \frac{LQ_0}{gAH_0} \quad (1-5)$$

式中: L 为压力引水管路的长度, m; Q_0 为稳定运行时的流量, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; A 为管路过水断面面积, m^2 ; H_0 为稳定运行时的水头, m。

当导水机构动作时会在压力管道内引起水击作用。而水击作用通常是与导水机构的调节作用相反。例如,导水机构关闭使机组输入能量与输出功率减小,但此时产生的水击会在一段时间内使机组功率增加,并抵消部分导水机构的调节作用,这种反调节作用将严重地影响水轮机调节系统的调节品质。另外,为了限制压力引水管道中水压最大变化值,必须限制导水机构的运动速度,这对调节系统动态特性也将产生不利影响。

(3) 有些水轮机具有双重调节机构,如转桨式和斜流式水轮机有导水机构和桨叶,水斗式水轮机有喷嘴和折向器,某些混流式水轮机装有控制水击作用的调压阀。于是调速器中需要增加一套调节和执行机构,从而增加了调速器的复杂性。另外,转桨式水轮机桨叶调节比导叶慢,这又增加了水轮机出力的滞后,对水轮机调节不利。

(4) 随着电力系统的容量增加和自动化程度的提高,要求水轮机调速器具有越来越多的自动操作和自动控制功能,如快速自动准同期、功率反馈等。这就使得水轮机调速器成为水电站中一个十分重要的综合自动装置。

(5) 水轮机调节系统是一个复杂的非线性系统,同时涉及水力、机械和电气方面的内容,几者之间互相作用、互相影响。

总之,水轮机调节系统相对来说不易稳定,结构复杂,要求具有较强的功能。

第 2 节 调速器型号、结构及分类

§ 1.2.1 调速器型号

我国调速器产品型号由三部分代号组成,各部分代号用“—”分开。第一部分为调速器的基本特征和类型;第二部分为调速器容量;第三部分为调速器使用额定油压。其排列形式为 $\boxed{1}\boxed{2}\boxed{3}\boxed{4}-\boxed{5}\boxed{6}-\boxed{7}$ 。各方框中字母和数字含义如下:

1——大型(无代号),通流式(T),中小型带(或配有)油压装置(Y)。

2——机械液压型(无代号),电气液压型(D),微机液压型(W)。

3——单调节(无代号),双调节(S)。

4——调速器基本代号 (T)。

5——调速器容量, 大型的数字表示主配压阀直径, 单位为 mm; 中小型的数字表示接力器容量, 单位为 $9.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

6——改型标记 (A, B, C, D)。

7——额定油压在 2.5 MPa 及以下者无数字, 在 2.5 MPa 以上者为油压数值。

例如, YT-600 表示小型带油压装置的机械液压型单调节调速器, 接力器容量为 $600 \times 9.8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 额定油压在 2.5 MPa 及以下。

§ 1.2.2 调速器系统结构

水轮机调速器有多种类型, 但一般调速器总是由测量元件、放大元件、校正元件等环节组成。各环节之间的信号传递、变换与综合的方式不同, 构成了不同形式的调速器。

1. 机械液压调速器

如图 1-6 所示, 发电机的转速信号经测量元件测量并与给定转速值比较, 其偏差信号与外加的各种指令信号以及永态和暂态反馈信号综合, 然后该信号经放大并通过主配压阀控制主接力器, 从而推动导水机构, 调节水轮机出力。

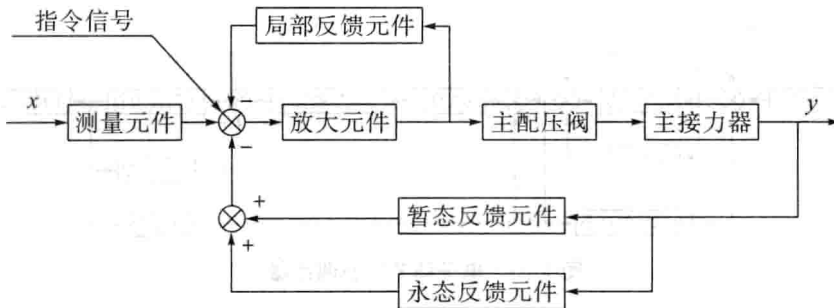


图 1-6 机械液压调速器

最早的水轮机调速器都是机械液压调速器, 它是随着水电建设发展而在 20 世纪初发展起来的。它能满足带独立负荷和中小型电网中运行的水轮发电机组调节的需要, 有较好的静态特性和动态品质, 可靠性较高。但是, 面对大机组、大电网提出的高灵敏度、高性能和便于实现水电站自动化等要求, 机械液压调速器采用机械液压方法进行测量、信号综合和稳定调节的功能就显得力不从心。新建的大型水轮发电机组几乎不采用机械液压调速器。目前, 只有中小型机组, 特别是小型机组, 仍有一部分采用机械液压调速器。

2. 电气液压调速器

电气液压调速器由电液调节器与机械液压随动系统组成, 如图 1-7 所示。这类调速器的特点是由暂态、永态反馈元件, 包括放大元件及中间接力器构成电液调节器形成调节规律, 由主配压阀与主接力器组成的机械液压随动系统进行功率放大并驱动导水机构。其优点是调节规律的形成与导叶驱动分开, 调整方便, 死区较小, 但机械液压随动系统中存在着机械反馈, 当反馈机构距离较长时, 安装调整困难, 且对转速死区与动态特性有影响。

20 世纪 50 年代以后, 电气液压调速器获得了广泛的应用。从采用的元件来看, 它又

经历了电子管、电磁放大器、晶体管、集成电路等几个发展阶段。20 世纪 80 年代末期，出现了水轮机微机调速器并被广泛采用，但现在很少有生产电气液压调速器的厂家了。

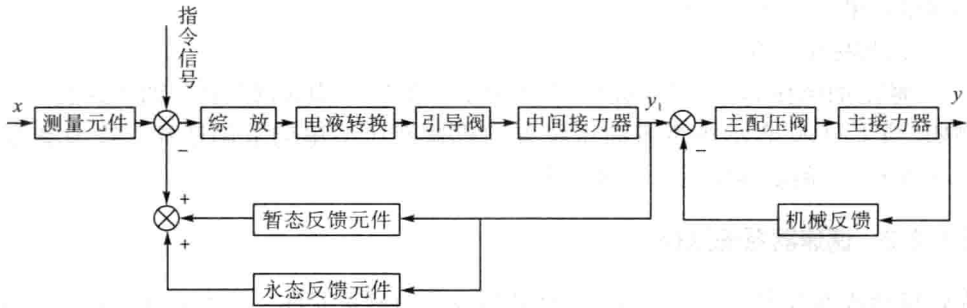


图 1-7 电气液压调速器

3. 电子调节器型调速器

电子调节器型调速器见图 1-8，转速测量和比较后先经由比例环节、积分环节、微分环节以及水态反馈环节构成的调节器形成调节规律，再由电液随动系统放大后驱动导水机构。其特点是调节规律准确，机构简单，死区小。

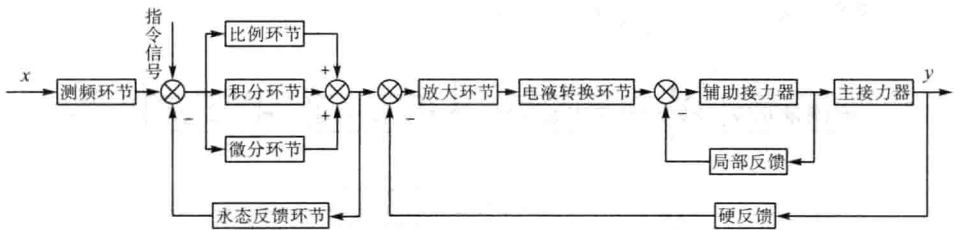


图 1-8 电子调节器型调速器

从 20 世纪 70 年代初，Intel 公司推出第一个微处理器开始，到 20 世纪 70 年代末，国内外调速器专家就及时将微机控制技术引入水轮机调节领域。20 世纪 80 年代是水轮机调速器迅速发展的时期，世界上发达国家的著名水轮机调速器公司都先后研制了微机调速器。例如，日立公司研制的微机调速器样机于 20 世纪 80 年代初应用于抽水蓄能机组；ABB 公司也起步较早，其产品在我国和其他一些国家的电站得到应用。此外，还有法国的奈尔皮克 (NEYRPIC) 公司，德国的西门子 (SIEMENS)、福伊特 (VOITH) 公司，美国的伍德华德 (WOODWARD) 公司等都先后推出了自己的产品。我国从事微机调速器的研制开发的步伐与国外大体相同。华中理工大学于 1979—1981 年开始了微机调速器的理论研究，并与天津水电控制设备厂协作，于 1984 年 11 月成功研制出我国第一台微机调速器，在湖南欧阳海水电站投入运行。此后，微机调速器的研制工作在许多地方和单位蓬勃开展起来，例如，南京自动化研究所、长江控制设备研究所、中国水利水电科学研究院自动化研究所、天津电气传动设计研究所、武汉水电控制设备公司、河海大学、武汉水利电力大学、东方电机厂和哈尔滨电机厂等都先后开展了这方面的工作，并做出了自己的成绩。

与微机调节器的迅速发展和应用同步，水轮机微机调速器的电机转换装置也由原来单一的电液转换器和电液伺服阀发展成为由步进电机/伺服电机构成的电液转换装置。同时

还研制成功了三态/多态阀式的机械液压系统。

4. 双重调节调速器

双重调节调速器一般由两部分组成，如图 1-9 所示。主调节部分，即导叶操作部分，其框图与单调节调速器基本相同。协联调节部分，即桨叶调节部分，主要由协联函数发生器和电液随动系统组成。例如，转桨式水轮机的双重调节调速器的协联调节部分负责桨叶的叶片角度调整。

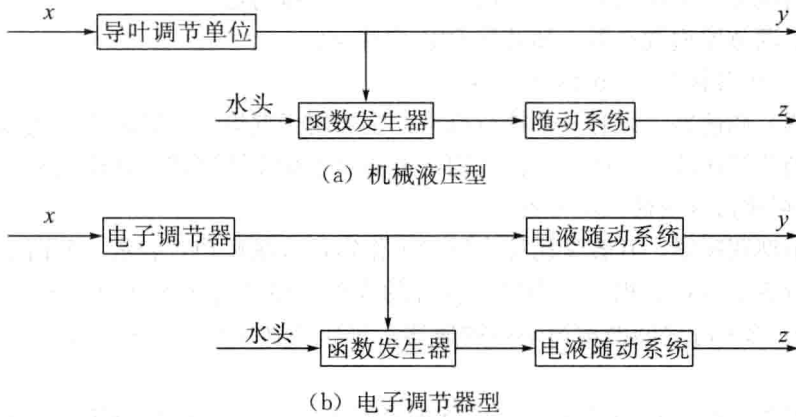


图 1-9 双重调节调速器

双重调节调速器协联装置经历了模拟协联至数字协联的发展，图 1-10 (a)、(b)、(c) 分别为在我国水电厂应用较多的机械协联、机电协联和电气协联三种类型。

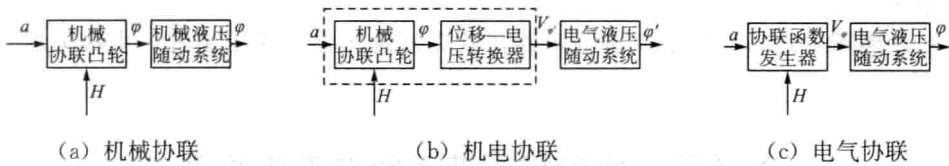


图 1-10 双重调节调速器类型

§ 1.2.3 调速器的分类

水轮机调速器的分类方法较多，从不同的角度进行如下分类。

1. 按照元件结构分类

(1) 机械液压型调速器的元件是由机械元件和液压放大元件构成，其中，机械元件如离心摆、调差机构、局部反馈等，液压放大元件如配压阀、缓冲器、接力器等。

(2) 电气液压型调速器的一部分元件是电气回路，如测频回路、缓冲回路、硬反馈回路、放大回路等；还有一部分是液压放大元件，如配压阀、接力器等。此外，还增加了电信号转换为机械液压信号的电液转换器和将位移信号转换为电信号的位移传感器。

(3) 微机调速器的元件为微机模块和液压放大元件，其中，微机模块如测频测相模块、A/D 和 D/A 转换模块、主机模块、键盘及显示模块等，液压放大元件如配压阀、接力器等。此外，与电气液压型调速器一样，也包括了将电信号转换为机械液压信号的电液转换器和将位移信号转换为电信号的位移传感器。

2. 按照调速器调节规律分类

- (1) PI 型（比例—积分规律）调速器。
- (2) PID 型（比例—积分—微分规律）调速器。

3. 按照反馈的位置分类

(1) 辅助接力器型调速器。反馈信号取自于主接力器，习惯称为辅助接力器型调速器。

(2) 中间接力器型调速器。反馈信号取自于中间接力器。

(3) 电子调节器型调速器。如并联 PID 型调速器。

4. 按照调速器执行机构的数量分类

(1) 单调节调速器。只有一个执行机构，主要用于混流式、轴流定桨式水轮机。

(2) 双调节调速器。有两个执行机构，主要用于轴流转桨式、冲击式水轮机。

5. 按照调速器容量的大小分类

(1) 中小型调速器。其容量用接力器的工作容量（操作功）表示。所谓工作容量，是指设计油压与活塞有效面积、接力器全行程的乘积，单位是牛·米（ $N \cdot m$ ）。操作功在 $100000 \sim 30000 N \cdot m$ 之间的称为中型调速器；操作功在 $10000 N \cdot m$ 及以下的称为小型调速器。

(2) 大型调速器。其容量用主配压阀的直径表示；国家颁布的等级标准有 80 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm 四级。

6. 按照调速器所用油压装置和主接力器是否单独设置分类

(1) 整体式。整体式一般为中小型调速器，它将机械液压柜、油压装置、主接力器作为一个整体。

(2) 分离式。分离式用于大型调速器，其机械液压柜、油压装置、主接力器均独立设置。

第 3 节 水轮机调节系统的工作原理

§ 1.3.1 单调节的水轮机调节系统原理

水轮机调节系统由调速器和被控制对象两大部分组成，构成一个闭环系统。下面以机械液压型调速器为例，分析单调节系统的工作原理，图 1-11 为调速器原理简图。调速器由离心摆、引导阀、辅助接力器 35、主配压阀 37、主接力器 39、缓冲器 18、调差机构、手轮 21 及其杠杆系统组成。

离心摆测量机组转速，并把转速变化信号转换为位移信号。由于离心摆的负载能力很小，要推动笨重的导水机构，必须采用放大装置，为此，引导阀和辅助接力器构成第一级液压放大装置，主配压阀和主接力器则构成了第二级液压放大装置。从辅助接力器输出一信号反馈至引导阀针塞杆，作为第一级液压放大装置的局部反馈；从主接力器输出一信号经缓冲器和调差机构反馈到引导阀针塞杆，作为主反馈信号。

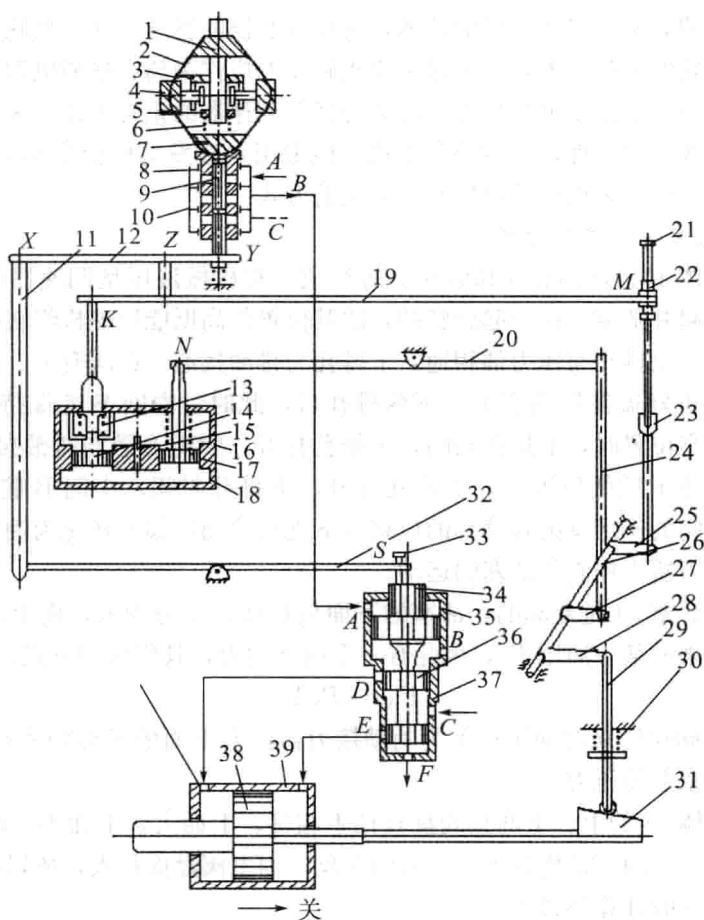


图 1-11 调速器原理简图

1—离心摆转轴；2—钢带；3—限位架；4—重块；5—调节螺母；6，13，16—压缩弹簧；7—下支持块；8—引导阀转动套；9—引导阀针阀；10—引导阀壳体；11，24，29—拉杆；12，19，20，32—杠杆；14—缓冲器从动活塞；15—节流针塞；17—缓冲器主动活塞；18—缓冲器；21—手轮；22—螺母；23—丝杆；25，27，28—拐臂；26—回复轴；30—弹簧；31—楔块；33—调节螺钉；34—辅助接力器活塞；35—辅助接力器；36—主配压阀阀体；37—主配压阀；38—主接力器活塞；39—主接力器

1. 离心摆的工作原理

离心摆有两个重块4，它们通过钢带2，与转轴1相连，下与下支持块7连接。下支持块与转轴之间有压缩弹簧6、调节螺母5、限位架3。装在离心摆上面的电动机通过转轴拖动离心摆转动，转动时重块产生离心力使钢带张开，并使下支持块上移压缩弹簧。在某一位置时，作用在离心摆上的各种力正好平衡，使离心摆处于某一种平衡状态运行。若此时转速增加，重块的离心力也增加，于是克服弹簧阻力带动下支持块上移；若转速降低，则离心力减小，弹簧力使下支持块下移。下支持块的位移即为离心摆的输出信号，在忽略惯性力和液压摩擦阻力时，输出量与输入量成正比关系，故离心摆是一个比例环节。带动离心摆转动的交流感应电动机的电源有以下两种：

- (1) 来自与主机同轴的永磁发电机。
- (2) 来自发电机机端电压互感器。

电动机电源的频率反映了主机的转速，所以离心摆的转速变化也反映了机组的转速变化。在大中型水轮发电机组上，一般都采用永磁发电机作为离心摆的电源，这是因为在主机励磁切除情况下，永磁发电机仍可保证离心摆及调速器的正常工作。采用永磁发电机还可保证离心摆电源的可靠性，减少外部干扰。但采用永磁发电机会增加主机结构的投资，故在小型机组上一般只采用机端电压互感供电的方式。

2. 液压放大装置的工作原理

引导阀由壳体 10、转动套 8 和针阀 9 等组成。在机械液压型调速器中，转动套是与下支持块连在一起并随离心摆一起旋转的，故其位置的高低能反映机组转速的快慢。在转动套上有三排孔，上排孔与压力油相通，下排孔与排油接通。针阀有上、下两个阀盘，在相对中间位置时正好盖住转动套上、下两排孔口，此时，中间 B 腔保持在某一油压下。当转动套处于较高位置时，上排孔封闭，下排孔打开，中间 B 腔与排油接通，压力降低；反之，当转动套处于较低位置时，上排孔打开，下排孔封闭，中间 B 腔与压力油相通，压力上升。引导阀的作用是把转动套的位移（下支持块的位移）转化为油压的变化，此油压输送到辅助接力器去控制其活塞的运动。

辅助接力器活塞 34 是差动的，活塞的下面接排油，压力为零，而上面的环形面积上作用着从引导阀来的某一油压 P_i ，因此有一个向下的力，其值可用下式计算：

$$F_A = P_i A \quad (1-6)$$

式中： P_i 为引导阀输送来的油压； A 为辅助接力器活塞上面的环形面积； F_A 为油压作用在辅助接力器活塞上的压力。

主配压阀阀体 36 的上、下两只阀盘直径不相等，上面大，下面小。两阀盘之间通有压力油，它对上、下两阀盘均有推力，方向相反。因上阀盘面积大，所以综合起来是一个向上的作用力，它的计算公式为

$$F_M = P(A_1 - A_2) \quad (1-7)$$

式中： F_M 为油作用在主配压阀阀盘上的合力； P 为压力油的压强； A_1 、 A_2 分别为上、下阀盘受油的面积。

辅助接力器活塞 34 与主配压阀阀体 36 连成整体，其状态取决于 F_M 与 F_A 两力之差（不计活塞与阀体质量）。当 $F_M = F_A$ 时，辅助接力器活塞与主配压阀阀体不动；当 $F_M > F_A$ 时，辅助接力器活塞与主配压阀阀体向上移；当 $F_M < F_A$ 时，辅助接力器活塞与主配压阀阀体向下移。辅助接力器活塞的运动又通过调节螺钉 33、杠杆 32、拉杆 11、杠杆 12 传到引导阀的针阀上，此杠杆系统就组成了第一级液压放大装置的内部反馈校正。因为它是通过杠杆系统来传递信号，故是一个比例环节。

当转速升高至某一值，引导阀转动套上移至某一位置，引导阀的输出油压降低，辅助接力器活塞跟着上移，经过杠杆系统使针阀也上移。当针阀上移到与转动套回复相对中间位置时，引导阀的输出油压也恢复到原来的数值，于是辅助接力器活塞上的作用力与主配压阀阀体上的作用力恢复平衡，活塞停止移动。活塞位移 m_A 与引导阀转动套或针阀位移量 s 是成比例的，两者位移的方向相同，其比例系数为杠杆系统的传动比 k ，则有

$$m_A = ks \quad (1-8)$$

k 值可在 2~10 之间调整，这样就把离心摆下支持块的位移放大了，同时由于辅助接力器活塞面积大，因此，油压作用在辅助接力器活塞上的力也大了，可克服几十牛顿至几

百牛顿的干摩擦力而不致造成过大的不灵敏度。

但这个力还是不足以推动笨重的导水机构，因此需要第二级液压放大装置进一步放大。由主配压阀与主接力器组成了第二级液压放大装置，主配压阀阀体 36 与辅助接力器活塞 34 是连成整体的，所以主配压阀阀体随着辅助接力器活塞移动。主配压阀 37 控制主接力器 39，主接力器是双向作用的，即在活塞两侧均通有可控油压，此油压受主配压阀控制，主配衬套的中间油孔 *C* 与压力油相通，衬套的顶端及底端两侧与排油相通。衬套的上、下油孔与主接力器活塞 38 两侧的油缸相通，主配压阀阀体在中间位置时，上、下两阀盘正好遮住 *D*、*E* 两孔。此时主接力器活塞两侧油压基本相等，活塞不动。若主配压阀阀体上移，则 *D* 孔与压力油接通，*E* 孔与排油接通，主接力器在油压作用下向右移动，关闭导水机构。若主配压阀阀体下移则正好相反，*D* 孔与排油接通，*E* 孔与压力油接通，接力器活塞在油压作用下向左移动，开启导水机构。

3. 缓冲器的工作原理

缓冲器是一个反馈校正装置，其性能直接影响调节系统的稳定。缓冲器就是一只连通器，里面充满油。主动活塞 17 通过杠杆 20、拉杆 24、拐臂 27、回复轴 26、拐臂 28、拉杆 29、楔块 31 与主接力器活塞 38 相连。从动活塞 14 则通过杠杆 19、杠杆 12 与引导阀针阀 9 相连。从动活塞由压缩弹簧 13 与支架定位，正常工作时处于中间位置，当主动活塞因接力器移动而被迫下移时，因油是不可压缩流体，来不及从节流孔流到上部去，故油压会升高，此油压力作用在从动活塞上，使从动活塞上升，从而将信号输送到引导阀上去。从动活塞上升使弹簧压缩，随后活塞底部的油慢慢地通过节流孔流到活塞上部去。在弹簧压力作用下，从动活塞也就慢慢地恢复到中间位置。当主动活塞上移时，活塞下部产生负压，把从动活塞吸下来，从而将信号送到引导阀上，此时也压缩弹簧。随后，由于油慢慢地从上部流到下部，在弹簧压力作用下，从动活塞又恢复到中间位置。缓冲器的工作由节流针塞 15 来调节，如把节流针塞全部打开，此时活塞上、下两腔接通，油可以迅速流动，从动活塞就一直处于中间位置，即信号输出为零，这相当于切除了缓冲器，此时水轮机调节系统就不稳定了，这是因为水轮机调节系统含有压力引水系统，在调节过程中，由于水的惯性产生水击，并引起反调节功率，从而使调节系统产生过调节，没有校正装置，调节系统是不稳定的，这一点已在生产实践中得到了证实。当机组单独运行时（如机组在与系统并列之前），如果切除缓冲器，即可观察到调节系统的振荡。因此，机组在单独运行时，是不允许切除缓冲器的。如把节流针塞全部关闭，使上、下腔完全隔绝，那么从动活塞在随着主动活塞偏离中间位置后，就不会自动恢复到中间位置，而是保持输出信号不变。也就是说，反馈信号不仅在调节过程中存在，而且在调节过程结束后仍然存在。此时缓冲器成为比例反馈，即硬反馈，调节后会有 40%~60% 的静态误差，这显然是太大了。在工程实践中，要求调节系统的反馈信号只在调节过程中存在，而在调节过程结束后为零，也就是缓冲器要起软反馈的作用。为此，当把节流针塞放在中间某一位置时，就会出现上面已经描述的工作过程，即缓冲器主动活塞移动后，从动活塞先跟着偏离中间位置，再输出一个信号，然后逐步恢复到中间位置，输出信号就等于零。

4. 调节系统的工作原理

当机组单独带负荷运行时，如果负荷突然减少，此时水轮机主动力矩大于发电机电阻力矩，机组开始加速，转速升高，通过永磁发电机和感应电动机使离心摆转轴 1 的转速增