

高等学校教材

水轮机调节

第三版

河海大学 沈祖诒 主编

0.7
E3





水轮机调节

水轮机调节

第二版

机械工业出版社



高等学校教材

水轮机调节

(第三版)

河海大学 沈祖诒 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书是高等学校水动专业通用教材。主要内容：水轮机调节系统基本工作原理；机械液压型、模拟式电气液压型和微机调速器；调速器和调节对象的动态特性；水轮机调节系统稳定性、动态品质和参数整定；调节保证计算；水轮机调节系统计算机辅助分析；调节设备选型、调整和试验。

本教材除供有关高等学校教学用书外，亦可供从事水轮机调节系统设计、制造、安装、调试和运行等方面工作的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水轮机调节/沈祖诒主编. —3版. —北京: 中国水利水电出版社, 1997
高等学校教材

ISBN 7-80124-412-5

I. 水… II. 沈… III. ~~水轮机, 调节-高等学校-教材~~ IV. TK730.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 11439 号

书 名	高等学校教材 水轮机调节 (第三版)
作 者	河海大学 沈祖诒 主编
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 476 千字 1 插页
版 次	1981 年 4 月第一版 1988 年 11 月第二版 1998 年 5 月第三版 2001 年 5 月北京第七次印刷
印 数	21071—23070 册
定 价	25.40 元

第三版前言

本教材是根据 1992 年 5 月高等学校“水动专业”扬州会议拟订的《水轮机调节》编写大纲进行修订的。修订时，针对水动专业教学计划的修改和水轮机调节技术的发展，调整了章目，充实了内容。

考虑到水动专业教学计划已专门设置了“自动控制原理”作为技术基础课，本教材不再专门介绍自动控制原理，但为了方便广大读者，在第一章对其基本概念和方法作了简单介绍。

随着微机控制技术的发展，新建电站已普遍采用微机调速器，已建电站也正在将原有机械液压型调速器和模拟式电气液压型调速器更新为微机调速器，因此，专门增加了微机调速器一章。但目前机械液压型调速器和模拟式电气液压型调速器仍在使用，考虑到教材应具有适应性，故将三种调速器并列介绍。

根据多年来各校使用本教材的经验和水轮机调节理论和实践的发展，对其他章节，特别是水轮机调节系统动态分析、大波动过渡过程计算和水轮机调节系统仿真计算等均做了详尽的修订。

本教材由沈祖诒任主编。参加编写者有西安理工大学南海鹏（第一章）；河海大学严亚芳（第二、八章）；云南工业大学钱晓（第三章）；武汉水利电力大学刘炳文（第四、五、十章）；河海大学沈祖诒（第六、七、九章）。

本书由华中理工大学叶鲁卿教授主审，对书稿提出了许多宝贵的修改意见。另外，在修订过程中清华大学、华中理工大学、华北水利水电学院等兄弟院校从事“水轮机调节”课程教学的同志，也对本书提出了许多中肯的建议，在此一并表示衷心的感谢。

由于本书从制定编写大纲到出版历时数年，而水轮机调节理论与应用发展甚快，难免有不适宜或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

1996 年 11 月

第一版前言

本书是根据 1978 年召开的“水电站动力设备”专业座谈会的精神及在“水轮机调节”教材编写会上制定的大纲编写的。

全书主要内容有：水轮机调节系统的基本概念及工作原理；机械液压型及电气液压型调速器的结构和结线及其运动方程；自动调节理论简介；水轮机调节系统稳定性及动态品质分析；水轮机调节保证计算近似算法及用数字计算机的电算法；调节设备的选型、调整和试验。

本书除可作专业教材外，也可作为从事水轮机调节系统设计、制造、安装、调试和运行等方面的技术人员的参考书。本书所述内容均有一定的独立性，读者可根据需要选读其中有关的部分。

第一、二、八、九章及第十章第一节由华东水利学院沈祖诒、严亚芳编写；第三、四章、第十章二至六节及附录由武汉水利电力学院刘炳文、黄奕华编写；第五、六、七章由华北水利水电学院陈嘉谋编写。全书由沈祖诒主编。

本书由华中工学院刘育骥教授主审，参加审稿的还有华中工学院文辅湘、沈宗树、张昌期、李敬恒、邓家祺、魏守平等同志。审稿的同志对全书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

第二版前言

本书是根据1983年10月高等学校“水动专业”西安会议拟订的《水轮机调节》大纲进行修订的。修订时，针对水动专业培养目标并考虑水轮机调节理论和技术的发展，调整了章目，丰富充实了内容。

修订中把自动控制理论介绍放到第一章，增加了根轨迹法等内容，并以此作为全书的基础。由于新建大型水电站不再使用机械液压型调速器，机械液压型调速器一章改为以YT型调速器为典型对象，并强调了液压放大装置工作原理。电气液压型调速器一章得到加强，引入了若干电调技术中的新发展，如数字测频等；并且扼要但全面地介绍了电气液压型调速器的调整试验。在水轮机调节系统动态特性分析中，应用了控制原理的基本方法：频率响应法和根轨迹法；并给出了确定调速器参数的基本方法。除了大波动过渡过程电算法外，较详尽地阐述了水轮机调节系统的仿真计算。

本书第一、六章由陕西机械学院陈嘉谋编写；第二、八章由河海大学严业芳编写；第三、七、九章由河海大学沈祖诒编写；第四、五、十章由武汉水利电力学院刘炳文编写。全书由沈祖诒主编。

本书由华中工学院刘育骐教授主审，陈瑞甜等参加审稿。

在本书修订过程中清华大学、华中工学院、华北水利水电学院、云南工学院和江西工学院水利分院等兄弟院校从事《水轮机调节》课程教学工作的同志，对本书修订提出了许多宝贵的意见，在此表示感谢。

由于编者水平有限，在修订过程中仍会有不当和错误之处，敬希广大读者批评指正。

编者

1987年11月

目 录

第三版前言	
第一版前言	
第二版前言	
第一章 水轮机调节基本概念	1
第一节 水轮机调节的任务、特点和调速器的发展	1
第二节 自动控制原理提要	7
第二章 水轮机调节系统工作原理	22
第一节 水轮机调节系统原理简图	22
第二节 机组并列工作的静态分析	32
第三章 机械液压型调速器	38
第一节 离心摆	38
第二节 液压放大装置	46
第三节 暂态反馈	57
第四节 机械液压型调速器实例	62
第五节 油压装置	71
第四章 电气液压型调速器	79
第一节 测频回路	79
第二节 校正回路	99
第三节 功率给定、调差及人工失灵区回路	103
第四节 综合放大与开度限制回路	107
第五节 电气协联装置	112
第六节 电液转换器	122
第七节 电气液压型调速器实例	126
第五章 微机调速器	135
第一节 微机调速器基础——工业控制机及总线	135
第二节 微机调速器的基本原理	142
第三节 微机调速器的硬件和软件	148
第六章 调速器与调节对象的动态特性	162
第一节 调速器动态特性	162
第二节 水轮机动态特性	181
第三节 水轮机组段动态特性	186
第四节 发电机和负载动态特性	192
第七章 水轮机调节系统动态特性及参数整定	200

第一节	水轮机调节系统动态特性	200
第二节	水轮机调节系统稳定性分析	208
第三节	水轮机调节系统参数整定	220
第八章	调节保证计算及设备选择	232
第一节	调节保证计算的任务及标准	232
第二节	水击压力上升计算	233
第三节	转速上升计算	239
第四节	改善大波动过渡过程的措施	251
第五节	调节保证计算步骤与实例	255
第六节	调节设备选型	258
第九章	水轮机调节系统计算机辅助分析	263
第一节	水轮机调节系统大波动过渡过程计算	263
第二节	水轮机调节系统数字仿真	288
第十章	调速器的调整试验	309
第一节	调速器主要回路和元件的调整试验	309
第二节	调速器的整机调整和静特性试验	313
第三节	水轮机调节系统动态特性试验	315
主要参考文献	318

第一章 水轮机调节基本概念

第一节 水轮机调节的任务、特点和调速器的发展

一、水轮机调节的任务

水轮发电机组能够把水能变成电能，供用户使用。用户除要求供电安全可靠外，还要求电能的频率及电压保持在额定值附近的某一范围内，如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。此外，还应保证电钟指示与标准时间的误差在任何时间不大于 1 min；对大容量系统，不大于 30 s。

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大于此值），而且是不可预见的。此外，一天之内系统负荷有上午、晚上两个高峰和中午、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。

因此，必须根据负荷的变化不断调节水轮发电机组的有功功率输出，并维持机组转速（频率）在规定的范围内。这就是水轮机调节的基本任务。

既然电力系统要求能够调节水轮发电机组的功率输出，那么采用什么方法和途径来完成这一任务呢？下面以单机带负荷运行机组为例探讨这一问题。

如图 1-1，水轮发电机组的运动方程可按描述刚体绕固定轴转动的微分方程写为：

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

式中： J 为机组转动部分的转动惯量； ω （ $=\frac{n\pi}{30}$ ）为机组角速度； n 为机组转速； M_t 为水轮机动力矩； M_r 为发电机阻力矩。

水轮机动力矩取决于水轮机水头 H ，导叶开度 a （流量 Q ），机组转速 n 等。图 1-2 是水轮机单位力矩特性，它可由综合特性曲线换算或试验数据求得

$$M'_1 = \frac{KQ'_1\eta_m}{n'_1}$$

式中： M'_1 为单位力矩， $N \cdot m$ ； n'_1 为单位转速， r/min ； η_m 为模型效率； K 为系数， $K=9.81 \times 974 \times 9.81 \approx 93735$ 。

原型水轮机动力矩可由下式计算：

$$M_t = \frac{M'_1 D_1^3 H \eta_p}{\eta_m}$$

式中： D_1 为水轮机标称直径， m ； H 为水头， m ； η_p

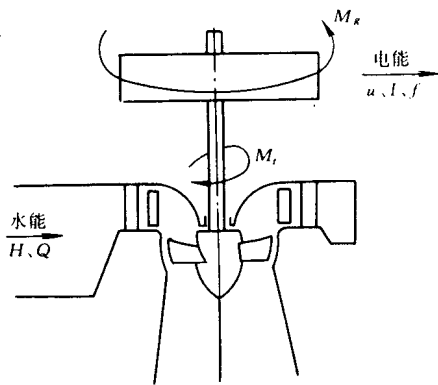


图 1-1 水轮发电机组示意图

为原型效率。

由图 1-2 可见，当导叶开度为某一值时，力矩随转速增加而减少，即 $\frac{dM_l}{dn'} < 0$ 。当转速相同时，力矩随导叶开度增加而增加。原型水轮机力矩特性与模型单位力矩特性相似，如图 1-3 所示。

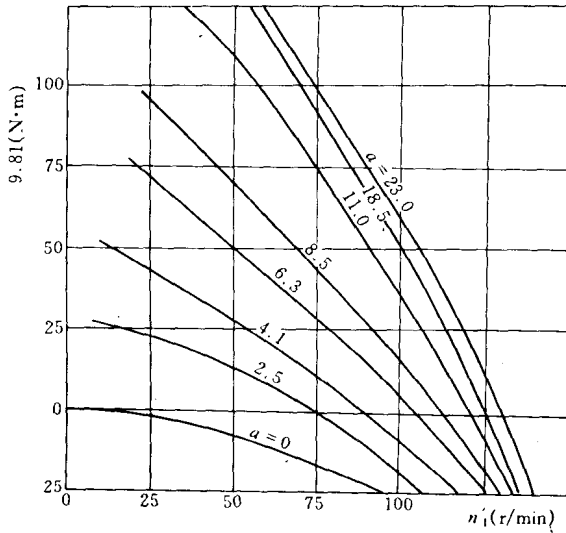


图 1-2 水轮机单位力矩特性

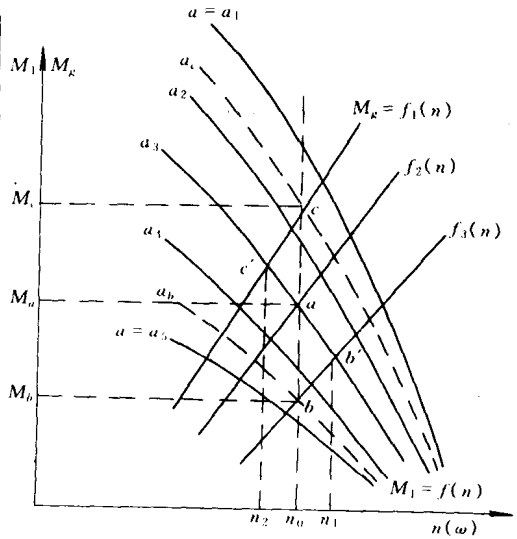


图 1-3 水轮机调节示意图

图 1-3 的力矩特性是在某一水头值时换算的，不同水头将有不同的力矩特性。

发电机阻力矩作用方向与发电机转子转向相反，代表发电机有功功率输出，即负荷（用户耗电功率）的大小，它与用户性质有关。一般地说，许多用户综合后的 M_g 是随转速增加而增加的（如图 1-4），即 $\frac{dM_g}{dn} > 0$ 。用电设备的组合不同，将有不同的 $M_g = f(n)$ 曲线。

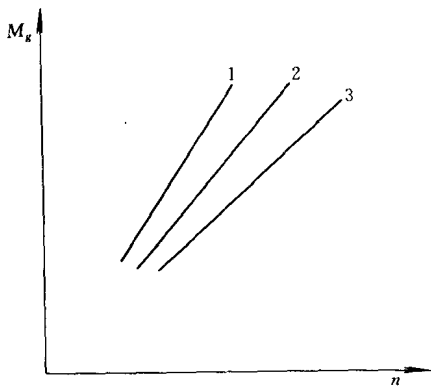


图 1-4 负荷阻力矩特性

由式 (1-1) 和图 1-3 可知，当负荷变化后，导叶开度不变，机组转速仍能稳定在某一数值上，水轮机及负荷的这种能力称为自平衡能力。但这样稳定后的转速将远远偏离额定值。例如当导叶开度不变，而机组所带负荷从额定值减到零时，其转速将增加到原额定值的 1.8~2.4 倍，显然不能满足系统频率的要求。

怎样才能使机组转速在负荷变化后还维持在原来的额定值呢？由图 1-3 可以看出，这需要相应改变导叶开度。当负荷减小，阻力矩由 $f_2(n)$ 变到 $f_3(n)$ 时，只需把导叶开度减小到 a_b ，机组转速将维持在 n_0 ；相反，当负荷增加时，相应开启导叶至 a_c ，亦就能维持转速不变。所以，只要改变导叶开度就能维持机组转速在额定值。

随着负荷的改变，相应改变导水机构（或喷嘴、桨叶）的开度，以使水轮发电机组的转速维持在某一额定值，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，或称水轮机调节。

由于负荷是不断变化的，因而水轮机调节也要不断进行，为此大多数电站都装有能自动进行水轮机调节的调速器。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（导水机构

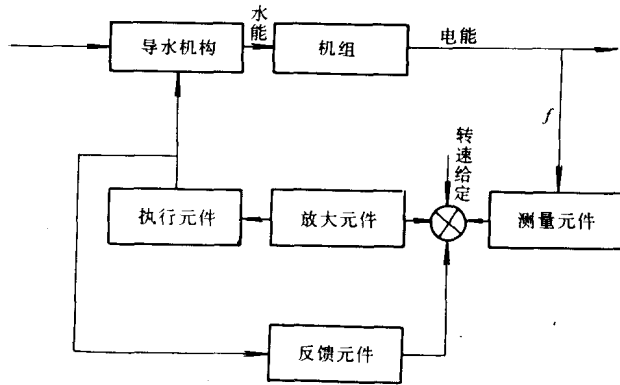


图 1-5 自动调节方框图

包括在机组内，不单独列出），调速器与机组构成了水轮机调节系统。它们的相互关系可用图 1-5 表示。机组的转速信号（被调节参数）送至测量元件，测量元件把频率信号转换为位移或电压信号，然后与给定信号综合，确定频率偏差及偏差的方向，并根据偏差情况按一定的调节规律发出调节命令。调节命令被放大后，送到执行元件去推动导水机构，反馈元件又把导叶开度变化的信息返回加法器，同时也形成必要的调节规律。调节规律可以在前向通道中形成，也可在反馈通道中形成。

二、水轮机调节的特点

水轮机调节系统与其他原动机调节系统相比有以下特点：

(1) 水轮发电机组是把水能变成电能的机械，而水能要受自然条件的限制，单位水体中所带有的能量较小，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，因而水轮机及其导水机构也相应较大。这就要求调速器设置多级液压放大元件，而液压放大元件的非线性及时间滞后有可能使水轮机调节系统调节品质恶化。

(2) 水电站受自然条件的限制，常有较长的压力引水管道。管道长，水流惯性大，导水机构开关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部分抵消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活动桨叶；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) 随着电力系统的扩大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。

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。

三、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、变换与综合的不同方式，构成了不同形式的调速器。

1. 缓冲式调速器

如图 1-6 所示，发电机的转速信号经测速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相综合，其后，该信号经放大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。机械液压调速器以及早期的电气液压（简称电液）调速器普遍采用这种系统结构，其特征是由形成调节规律的暂态与永态反馈元件包围从放大元件至主接力器的诸元件，这些元件承担形成调节规律与驱动导水机构双重职能，它们的静动态特性和非线性因素对调节规律有影响，且转速死区通常较大。

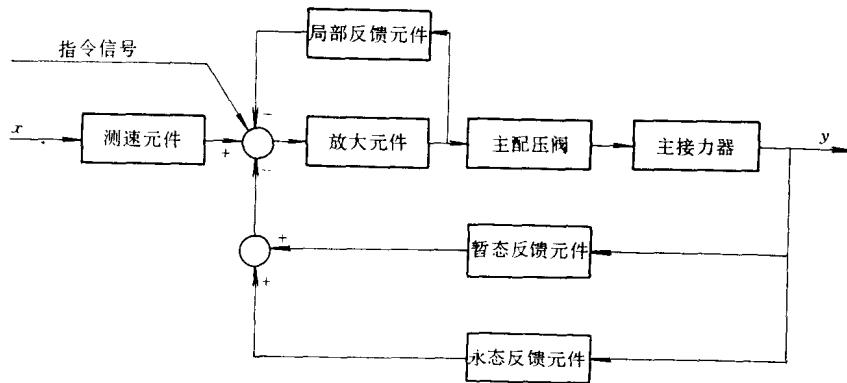


图 1-6 缓冲式调速器

2. 中间接力器式调速器

这类调速器由电液调节器与机械液压随动系统组成，其方框图如图 1-7 所示。这类调速器的特点是由暂态、永态反馈元件包围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

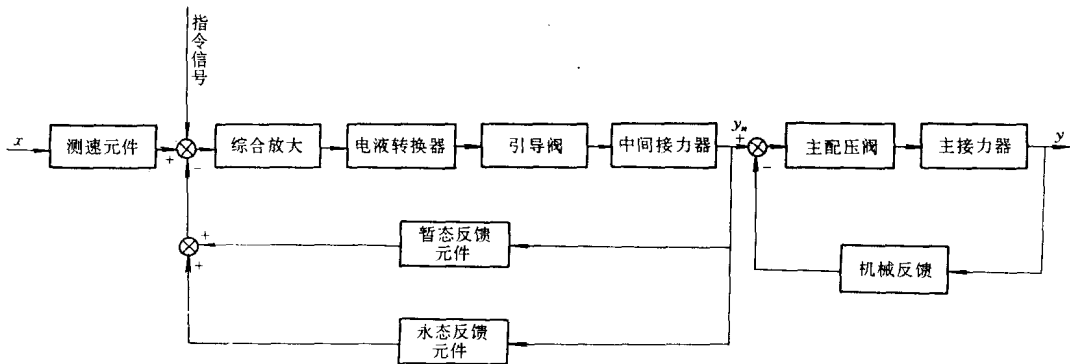


图 1-7 中间接力器式调速器

是调节规律形成与导叶驱动两职能分开,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,该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。

3. 电子调节器式调速器

电子调节器式调速器见图 1-8,转速测量和比较后经由比例单元、积分单元、微分单元以及永态反馈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。新设计的电液调速器以及微机调速器大多采用此种结构,其特点是调节规律准确,机构简单,死区小。

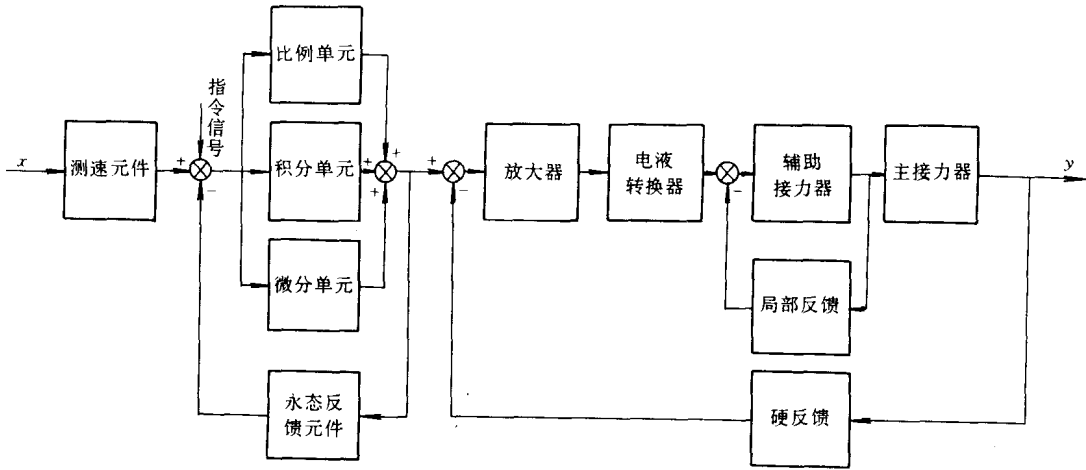


图 1-8 电子调节器式调速器

4. 双重调节调速器

双重调节调速器一般由两大部分组成,如图 1-9 (a) 所示。主调节部分即导叶操作部分的框图与单调节调速器基本相同,协联调节部分主要由协联函数发生器和功率放大随动

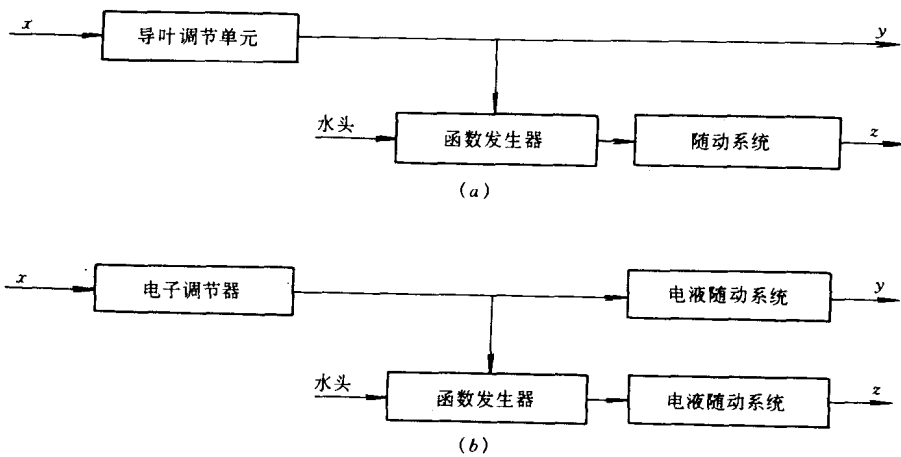


图 1-9 双重调节调速器

系统组成。

近年来随着电子调节器式调速器的出现，又可采用如图 1-9 (b) 所示双重调节调速器，函数发生器的导叶开度信号取自电子调节器输出，但至今仍以图 1-9 (a) 的结构为多。目前双重调节调速器实现协联的方式主要有机械协联，机电协联和电气协联。各种协联方式见图 1-10。

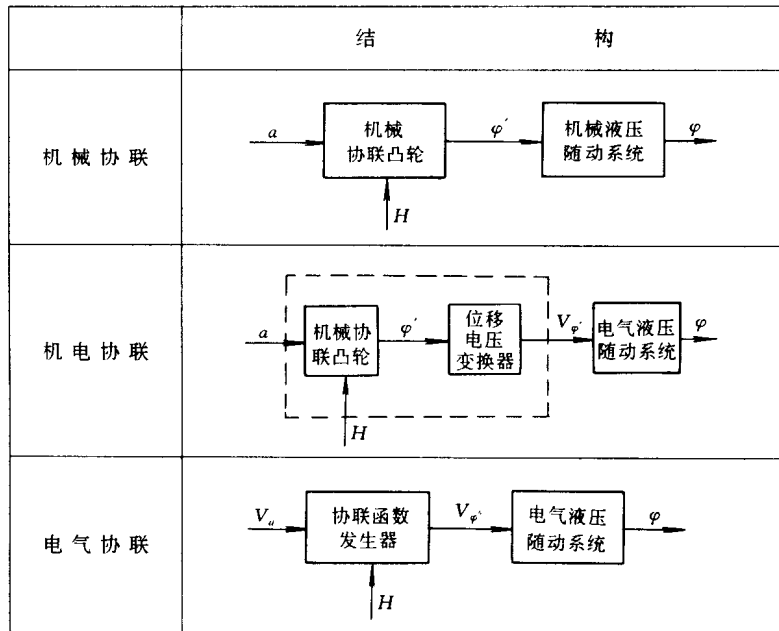


图 1-10 协联方式

国际电工大会 (IEC) 于 1986 年和 1993 年均提出了水轮机调节系统导则 (草案)，其中对水轮机调速器系统结构作了详细描述，读者可参考该导则。

四、调速器的分类与发展

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) 按元件结构的不同，调速器可分为机械液压型和电气液压器两大类。
- (2) 按调节规律可分为 PI 和 PID 调速器等。
- (3) 按反馈的位置，可分为辅助接力器型、中间接力器型及电子调节器型。
- (4) 按执行机构的数目可分为单调节和双调节调速器。
- (5) 按调速器的工作容量，调速器可分为大、中、小型。主配压直径在 80 mm 以上的称大型调速器；操作功在 10000~30000 N·m 之间称为中型调速器；操作功在 10000 N·m 及以下的称为小型调速器。

水轮机调速器在水电厂的应用已有很长的历史。早期的水轮机调速器是利用测速元件直接操作水轮机执行机构的直接作用式小型调速器。随着发展，19 世纪末叶出现了用液压元件进行功率放大的液压调速器，至 30 年代，已有相当完善的机械液压型调速器，并延用至今。

随着电子及液压技术的进步，出现了电气液型调速器。电气液型调速器发展初期，

仅以电气环节替代一些机械环节，随着电子调节器型调速器的出现，电液调速器才有了独立模式。从采用的元器件方面，其发展经历了电子管、晶体管、集成电路等发展阶段。从调节规律上，由PI（比例—积分）调节规律发展到PID（比例—积分—微分）调节规律。

随着计算机技术的普及和发展，水电厂在用计算机进行线控制的水平也日益提高。80年代以来，世界上先进国家都在研制微机调速器，目前已有一大批投入运行，逐渐趋于成熟。在调节规律方面正努力采用最优控制，状态反馈控制，自适应控制，预测控制，模糊控制，适应式变参数、变结构控制，人工智能控制和水压补偿信号控制等以保持水轮机调节系统处于最佳运行状态。

我国的水轮机调速器制造业是新中国建立后发展起来的。50年代和60年代制造了一大批机械液压型调速器，满足了我国水电事业发展的需要。60年代初期开始研制的电气液压型调速器，在70年代广泛使用，并由PI调节规律发展到PID调节规律。进入80年代，又开始研制微机调速器，目前已有许多台在电站运行。

第二节 自动控制原理提要

水轮机调节系统是一个自动控制系统，水轮机调速器就是一个自动控制器。为便于读者分析水轮机调节系统的工作和特性，本节简述一些有关自动控制理论的基本知识和方法。

一、数学模型

所谓一个系统或部件的数学模型，就是描述这个系统或部件输入、输出变量以及内部各变量之间关系（即动态特性）的数学表达式。常用的数学模型有微分方程、传递函数、动态结构图及状态方程等。

1. 微分方程与传递函数

众所周知，一个单输入单输出系统可以用如下微分方程描述

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y \\ = b_0 \frac{d^m x}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{dx}{dt} + b_m x \quad (n \geq m) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中： y 为系统输出变量； x 为系统输入变量。

如果描述系统的微分方程中的各项系数均为常数或仅仅是自变量 t 的函数，则系统为线性系统。若线性微分方程的各项系数为常数，则为线性定常系统。

线性系统的重要特征是满足叠加原理，因而当线性系统有多个输入时，就可以对各输入单独处理，然后将结果进行叠加以得出综合输出，这将使问题的分析大为简化。

线性定常系统的传递函数，定义为初始条件为零时，输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比。对方程式（1-2）两端进行拉普拉斯变换；得到该系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \quad (1-3)$$

从式（1-3）看出，传递函数实质上就是将定常线性微分方程变成以 s 为变量的代数方程，其各项系数仅取决于系统的参数，它表达了系统的动态特性，而与输入量的形式无关。

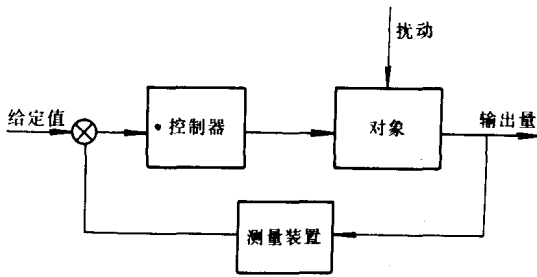


图 1-11 闭环控制系统方块图

2. 系统动态结构图 (方块图)

一个控制系统由具有各种不同功能的环节所构成。系统动态结构图就是系统中每个环节的功能和信号流向的一种图解表示。如图 1-11 即为典型的闭环控制系统方块图。

对一个实际的控制系统，其方块图可能是比较复杂的，需要对其进行简化。表 1-1 列出了简化方块图所遵循的一些主要法则，供查阅。值得注意的是在串联各环节之间存在有负载效应，必要时应加以考虑。

节之间存在有负载效应，必要时应加以考虑。

表 1-1 方块图简化法则

	原 方 块 图	等 效 方 块 图
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		