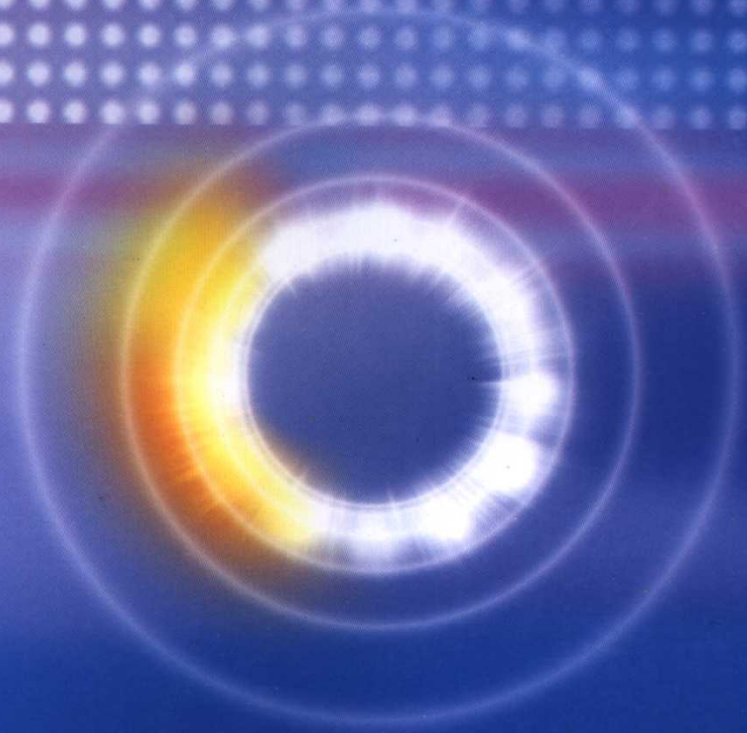


SHUILUNJI
TIAOJIE XITONG

水轮机调节系统

刘光明 刘德辉 编著



江西高校出版社

水轮机调节系统

刘光明 刘德辉 编著



江西高校出版社

图书在版编目(CIP)数据

水轮机调节系统/刘光明,刘德辉编著. —南昌:江西
高校出版社,2006.8

ISBN 7-81075-197-2

I. 水… II. ①刘… ②刘… III. 水轮机-调节系
统-高等学校-教材 IV. TK730.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 098373 号

江西高校出版社出版发行

(江西省南昌市洪都北大道 96 号)

邮编:330046 电话:(0791)8529392,8504319

江西太元科技有限公司照排部照排

南昌市光华印刷有限责任公司印刷

各地新华书店经销

*

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 16 印张 390 千字

印数:1~1000 册

定价:37.00 元

(江西高校版图书如有印刷、装订错误,请随时向承印厂调换)

内 容 摘 要

本教材系热能与动力工程类(水动方向)高等教育教材,是结合水电行业和专业特点,结合热能与动力工程类(水动方向)应用型人才培养要求所编写的专业教材。全书共分7章,分别为水轮机调节基本概念、机械液压调速器、电气液压调速器、微机调速器、水轮机调节系统动态特性、水轮机调节系统计算机辅助分析和调节保证计算。

本书可作为高等院校热能与动力工程类(水动方向本科)、水电站自动化(本科)、水电站动力设备与运行管理(专科)、水电设备及自动化(专科)等专业的教材,也可供水轮机调节系统设计、制造、运行、维护、安装、检修、调试、试验等方面工作的工程技术人员参考,还可作为水电职工的学习和培训教材。

前 言

依据我国当前水轮机调节领域的最新技术规范、规程、标准和名词术语,本教材的编写结合我国高等教育的现状和发展趋势,以及编者多年办学、教研和教学的丰富经验,内容力求充分反映我国水电发展的新技术、新成果和新水平。

根据热能与动力工程类(水动方向)应用型人才培养目标要求和我国水利水电事业对该专业毕业生的基本要求,本教材力求强调以综合应用能力和工程应用能力培养为主线,培养学生发现、分析和解决水电厂生产过程中的实际问题的能力,为今后从事专业技术工作奠定必要的专业基础。

本教材由南昌工程学院刘光明和刘德辉编写,由于编者水平有限,水轮机调节系统的理论及应用发展甚快,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者
2006年7月

目 录

第一章 水轮机调节的基本概念	(1)
1.1 水电站生产过程简介	(1)
1.2 水轮机调节系统简介	(2)
1.3 调速系统简介	(3)
1.4 水轮机调节的任务	(10)
1.5 水轮机调节的特点	(15)
1.6 水轮机调节系统原理	(19)
1.7 水轮机调节系统特性	(29)
第二章 机械液压调速器	(34)
2.1 机械液压调速器概述	(34)
2.2 测速环节	(35)
2.3 放大和执行环节	(42)
2.4 暂态反馈环节	(53)
2.5 YT型调速器的运行与维护	(60)
2.6 ST型调速器	(74)
2.7 中小型调速器的油压装置	(76)
第三章 电气液压调速器	(82)
3.1 概述	(82)
3.2 测频环节	(84)
3.3 频率微分环节	(97)
3.4 永态反馈环节	(98)
3.5 暂态反馈环节	(103)
3.6 综合放大环节和开度限制环节	(106)
3.7 电气协联环节	(111)
3.8 电液转换器和电液伺服阀	(114)
3.9 DST型电气液压调速器	(118)
3.10 电液调速器的运行与维护	(125)
第四章 微机调速器	(127)
4.1 概述	(127)

4.2	微机调节系统原理	(128)
4.3	PCC 微机调速器	(134)
4.4	WDT 微机调速器的硬件系统	(141)
4.5	WDT 微机调速器的软件系统	(148)
4.6	微机调速器的发展	(154)
第五章	水轮机调节系统动态特性	(155)
5.1	调速系统的数学模型	(155)
5.2	调速系统动态特性	(162)
5.3	调节对象动态特性	(166)
5.4	水轮机调节系统的数学模型	(177)
5.5	水轮机调节系统动态特性	(179)
第六章	水轮机调节系统计算机辅助分析	(183)
6.1	概述	(183)
6.2	水轮机调节系统的稳定性	(184)
6.3	水轮机调节系统动态品质	(189)
6.4	水轮机调节系统参数优化	(193)
6.5	水轮机调节系统数字仿真	(199)
6.6	水轮机调节系统仿真测试装置	(204)
第七章	调节保证计算	(216)
7.1	调节保证计算的任务和标准	(216)
7.2	水击压力上升计算	(218)
7.3	转速上升计算	(224)
7.4	改善大波动过渡过程的措施	(225)
7.5	调节设备选型计算	(229)
7.6	调节保证的计算步骤和实例	(234)
参考文献	(237)
附图一	YT 型调速器系统图	
附图二	ST 型机械液压调速器系统图	
附图三	PCC 电气系统原理图	

第一章 水轮机调节的基本概念

1.1 水电站生产过程简介

水电站生产的全过程是水机电的联合生产过程,图 1-1 所示为水电站生产过程示意图,图 1-2 所示为水电站生产过程及其能量变化框图。

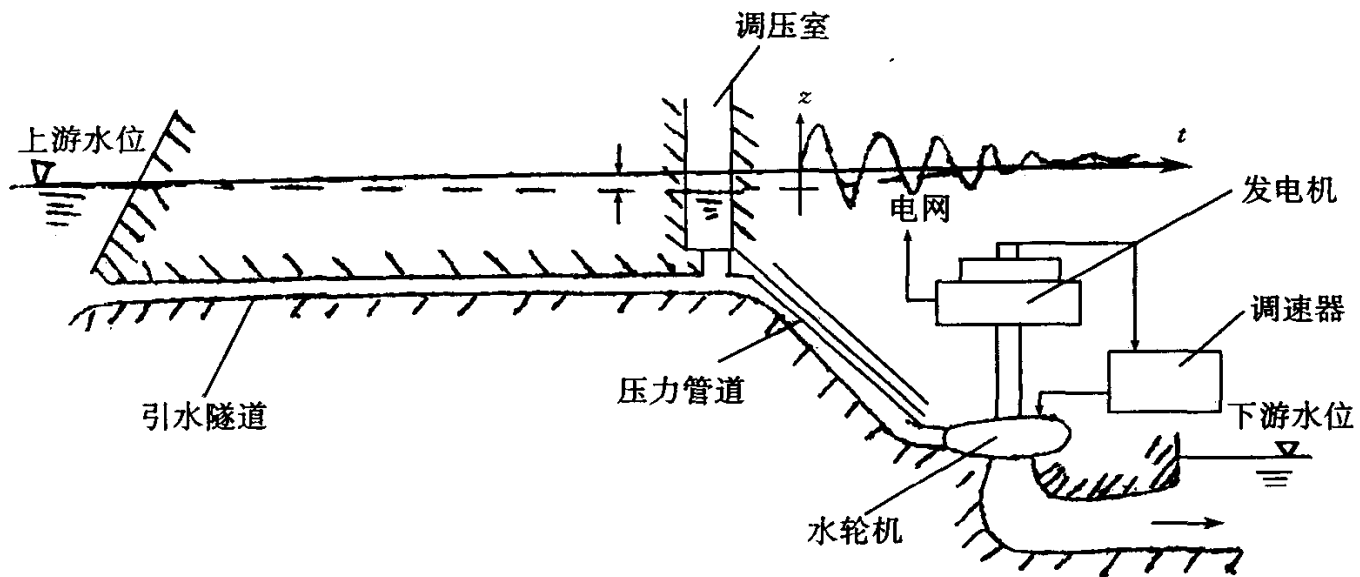


图 1-1 水电站生产过程示意图

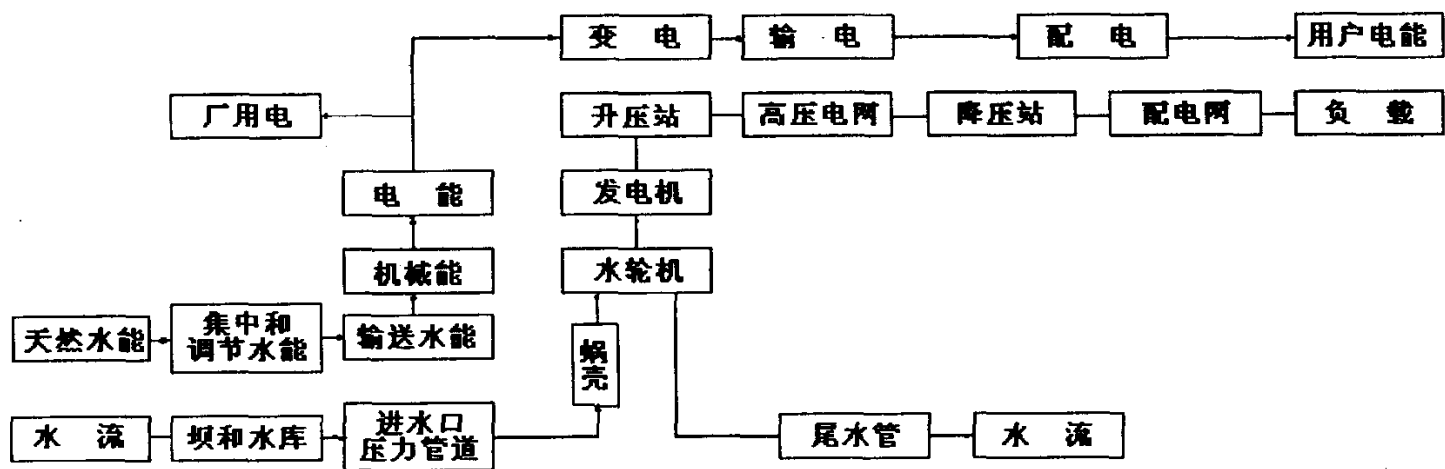


图 1-2 水电站生产过程及其能量变化框图

从图 1-1 和图 1-2 中可以看出,为了利用河流的天然水能来发电,必须在建设水电站的地点采用筑坝挡水的方式实现集中河段落差,运用压力引水系统输送水能到水轮机,水轮机将水能转变为机械能,水轮机作为交流发电机的原动机,用来带动发电机旋转,将机械能

转变为电能,电能自发电机输出送往电网,然后经电网电能又被送到用户,用户可根据自己的需要,将电能转变成各种形式的能量,如机械能、光能和热能等等。从以上电能生产过程可以看出:水电站生产的全过程就是水、机、电的联合生产过程。

1.2 水轮机调节系统简介

水轮机调节系统由被控制系统(调节对象)和控制系统(调速系统,又称调速器)所组成,图1-3所示为水轮机调节系统简图。由图可见,调节对象由水库、压力引水道、导水机构、蜗壳、水轮机、发电机和电网及负载等组成。由于水电站生产的全过程是水、机、电的联合生产过程,水轮发电机组一方面与水库、压力引水道、导水机构和蜗壳等有水力上的联系,另一方面与电力系统存在电气上的联系;调速系统一方面与水库、压力引水道、导水机构和蜗壳等有水力上的联系,另一方面与电网及负载有电气上的联系,再一方面又与水轮发电机组存在水、机、电三方面的联系,由此可见,水轮机调节系统是水、机、电综合控制系统。

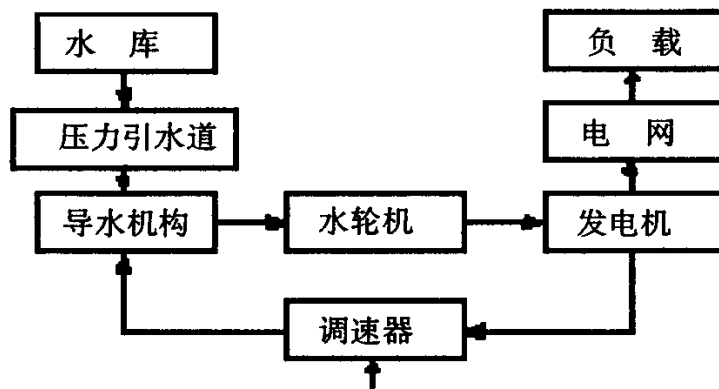


图 1-3 水轮机调节系统简图

为了满足电力系统运行的要求,使水轮发电机能被充分利用,就需要保持水轮机运行工况的稳定,将转速维持在额定范围内,转速又称为“调节参数”或“调节对象的输出量”。预先规定的由发电机本身参数所决定的机组转速额定值,称为“参考输出量”。在水头一定的情况下,水轮机转轮所获得的能量取决于水的流量,流量被称为“调节值”或“调节对象输入量”。

为了说明水轮机调节系统自动调节的实质,需要先对人工调节系统转速或频率的工作内容加以分析。所谓水轮机调节系统人工调节,实际上是指由运行值班人员完成的以下五项工作:

(1)值班人员通过直接观测仪表(频率表或转速表等)来监视水轮机运行时任一瞬间的转速变化。

(2)值班人员将任一瞬间监视所得的瞬间转速与额定转速进行比较,如有偏差,确定偏差的大小和方向。

(3)值班人员根据转速或频率偏差的方向和大小,迅速作出决策,决定操作导水机构调节的方向及启闭程度,发出开大或关小导叶开度的命令。

(4)根据命令,值班人员执行命令进行操作,将导水机构移到相应位置。

(5)值班人员操作完毕后,要再一次校核转速偏差的方向和大小,若转速偏差在允许的

规定范围内,调节过程结束;若转速偏差没有在允许的规定范围内,要进行第二次调节,直至转速偏差在允许的规定范围内为止。

由此可知,采用人工调节的供电质量,取决于值班人员的素质和责任心。此外,由于电网用电量变化频繁,采用人工调节时,值班人员劳动强度既大,精神又要高度集中,故不易持久。

自动调节则取决于机组和调节设备的特性。可以提高水轮发电机组运转的可靠性及电能质量。自动调节就是在没有人直接参与的情况下,依靠调节设备自动控制,使机组供电频率维持在允许偏差之内。

1.3 调速系统简介

1.3.1 调速器的组成

为了分析方便,一般常用方框形式代表调速系统中各组成元件,构成所谓方框图。方框图并不代表实际生产过程,只是反映“被调节参数”与“调节值”之间的联系及整个调节系统的组成。由图 1-4 可见,水轮发电机组和调速器组成了水轮机调节系统,而调速系统又由量测元件、计算决策元件以及执行元件等组成。

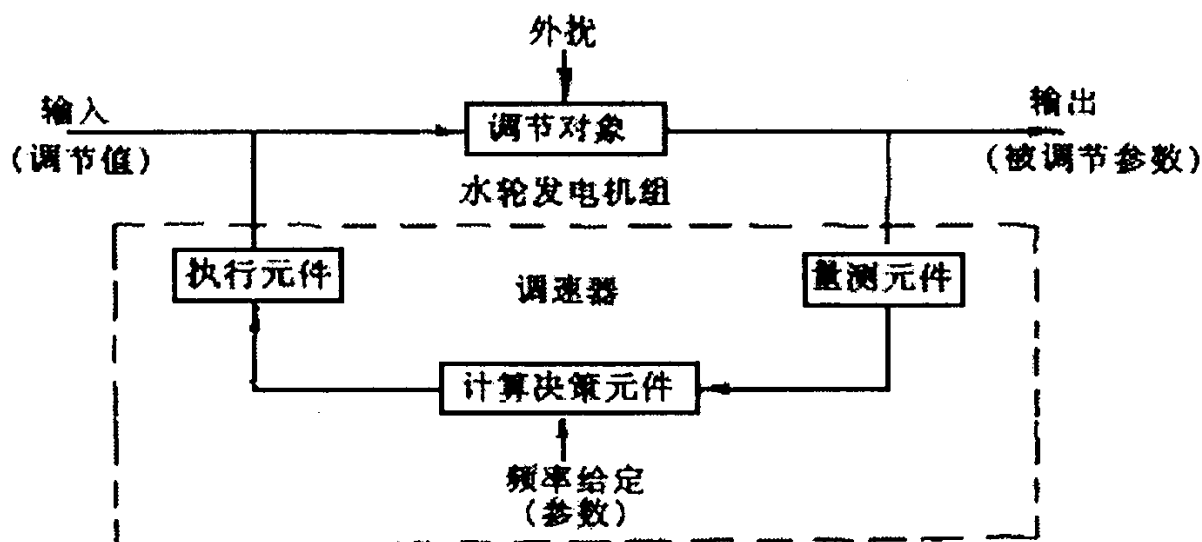


图 1-4 水轮机调节系统方框图

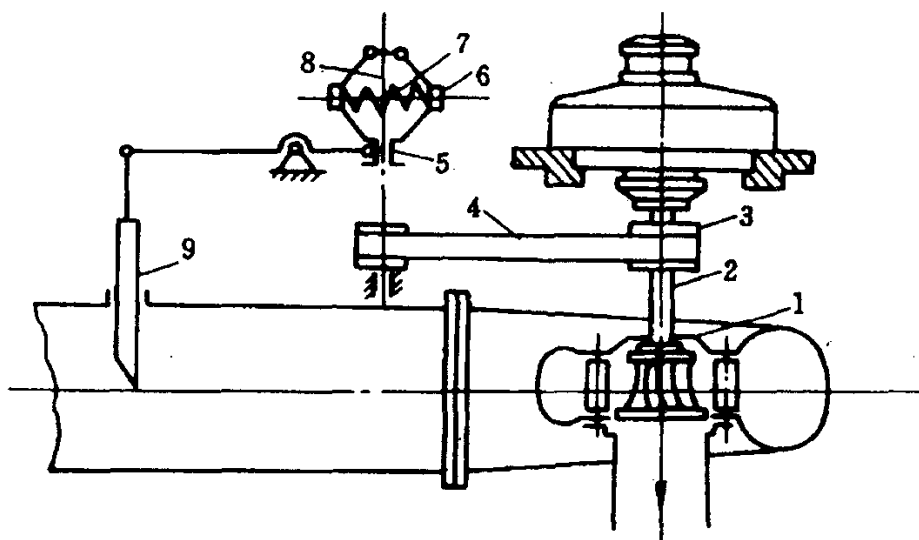
1. 量测元件

用来测量水轮发电机组运行时任一瞬间的转速变化,将任一瞬间转速与额定转速进行比较,确定转速偏差的大小和方向。若转速偏差没有在允许的规定范围内,发出开大或关小导叶开度的命令。图 1-5 所示的水轮发电机组主轴上的皮带轮即为量测元件,它能准确地反映出水轮发电机组主轴的转速,并由皮带将其传送出去。

2. 计算决策元件

计算决策元件能够将被调节参数任一瞬间值与“参考输入值”进行比较,并计算出偏差的方向和大小,作出操作决策,发布操作命令。图 1-5 中所示的离心飞摆就是计算决策元件。水轮发电机组主轴通过皮带轮和皮带带动离心飞摆旋转,使飞摆转速随机组转速的变

化而变化。而离心飞摆的重锤决定着套筒的位置高低。当机组以额定转速运行时,重锤刚好使套筒处于中间位置,此时机组出力与电网负荷平衡,转速不变。如果电网负荷减小,机组转速就上升,离心摆转速也随之上升,则重锤产生的离心力使弹簧拉长,重锤向外伸展,使套筒向上移,带动杠杆将阀门关小,进入水轮机转轮的水流流量相应减小,使机组输入能量与输出能量相平衡,转速维持在新的平衡状态下。反之,当电网负荷增加,机组转速下降时,则按照上述方法作相反的运动,同样可将机组转速维持在新的平衡状态下。由此可见,离心飞摆将被调节参数瞬间值转化为相应的离心力,与额定值(即弹簧原设计的弹力)相比较,就能按其偏差的方向和大小,确定重锤的位置,又通过连杆,确定套筒的位置。套筒移动时,阀门就随之启闭。故套筒的位移,实质就是发布操作命令,使执行元件按照命令控制进入调节对象的能量。所以离心摆确实能够完成计算决策和发布命令的任务,因而是一个“计算决策元件”。



1 水轮机;2 主轴;3 皮带轮;4 皮带;5 套筒;6 摆锤;7 弹簧;8 离心飞摆;9 阀门

图 1-5 水轮机自动调节系统示意图

3. 执行元件

图 1-5 中所示的阀门 9 就是所谓的执行元件,它按照计算决策元件的命令动作,对调节对象进行控制,执行开大或关小导叶开度命令。

水轮机调速器就是根据以上三种基本元件组成的自动调节装置的调节原理而制成的。

1.3.2 调速器分类

1. 机械液压型、电气液压型和微机液压型

调速器根据不同的分类方法有许多不同的类型,如按元件结构组成的不同,调速器可分为机械液压型、电气液压型和微机液压型。

图 1-6 所示为机械液压型调速器方框图,在机械液压型调速器中,测量环节采用离心摆,综合加法器环节采用扛杆系统等,放大执行环节通常采用由二级液压放大装置或液压伺服装置组成的液压随动系统。第一级放大环节由引导阀和辅助接力器及反馈扛杆组成;第二级放大执行环节由主配压阀和主接力器组成。永态反馈环节采用扛杆系统,暂态反馈环节由扛杆系统和缓冲器构成。

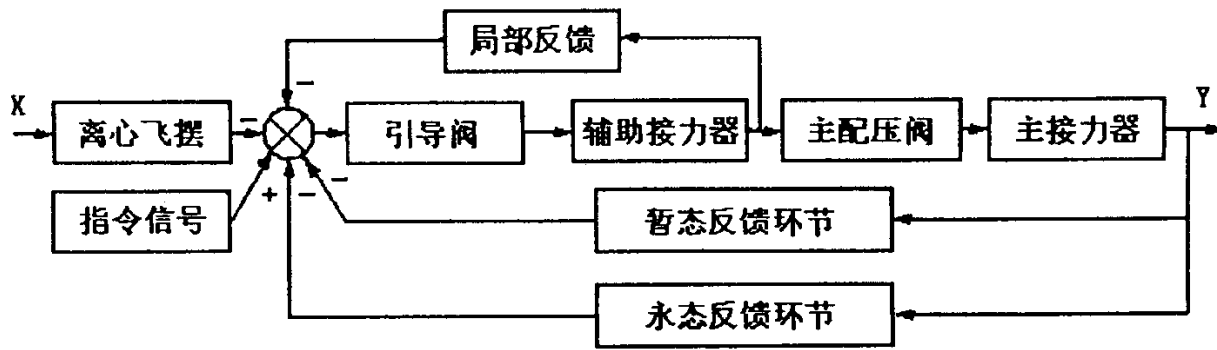


图 1-6 机械液压型调速器方框图

转速信号由专门用于测量机组转速的永磁发电机引至离心摆,离心摆的输出信号经综合加法器送至引导阀及辅助接力器。辅助接力器输出信号经局部反馈杠杆传送至综合加法器,由引导阀、辅助接力器和局部反馈杠杆组成第一级液压放大装置。同时,辅助接力器输出信号经由主配压阀和主接力器构成的液压伺服装置进行第二级放大后控制导水机构。主接力器行程经杠杆系统形成的永态反馈信号及由杠杆系统和缓冲器形成的暂态反馈信号反馈至综合加法器上。

图 1-7 所示为电气液压型调速器方框图,在电气液压型调速器中,一部分元件是电气的,一部分元件则是机械液压型的。测量环节采用测频回路,测频回路又有模拟测频和数字测频技术之区分;反馈环节有位电传感器和微分回路等;综合加法器、调差、频率给定和开度限制等都采用电气回路;放大环节仍采用液压放大装置和液压伺服装置组成的液压随动系统;电气信号转换为机械位移或液压信号,由电液转换器或电液伺服阀完成。

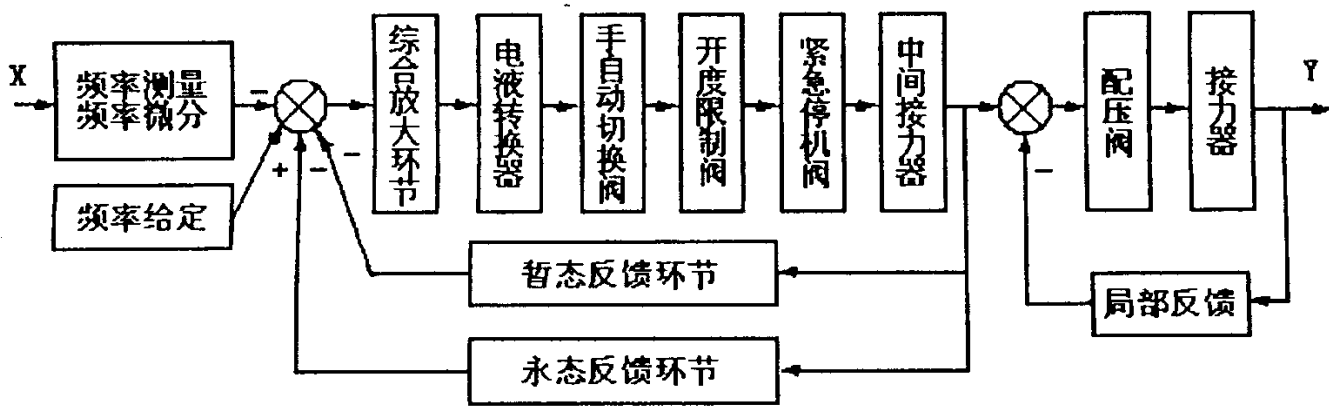


图 1-7 电气液压型调速器方框图

图 1-8 所示为微机液压型调速器方框图。从图中可见,微机调速器由微机控制器、手操回路和数液随动系统(或电液随动系统)所组成。图中微机控制器采用双微机带通讯结构类型,也可采用由 PLC 构成的微机控制器,数液随动系统采用步进电机的数液随动系统,也可采用由电液转换器或电液伺服阀完成电气信号至机械位移或液压信号转换的电液随动系统,测量环节广泛采用软件数字测频技术,模拟测频模块作为热备用。

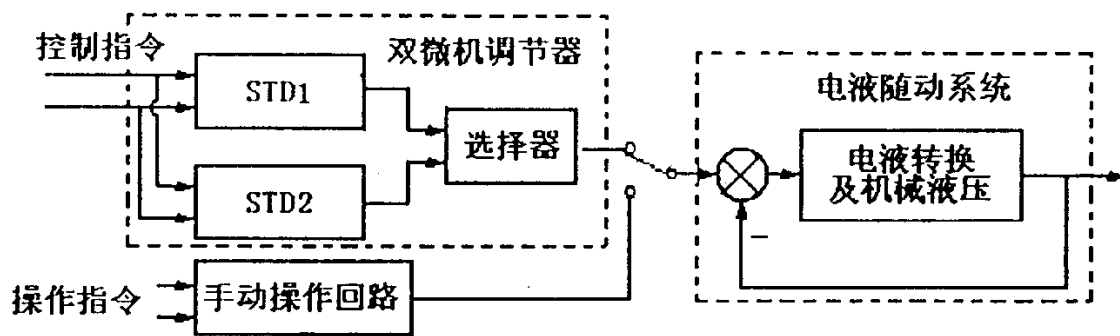


图 1-8 微机液压型调速器方框图

2. PI 型调速器和 PID 型调速器

调速器根据调节规律不同可分为 PI 型调速器和 PID 型调速器。

图 1-6 所示的机械液压型调速器和前期的电气液压型调速器都是按转速偏差进行调节的比例积分型调速器,即 PI 型调速器;后期的电气液压型调速器多采用按转速偏差及加速度调节进行调节的比例积分微分型调速器,即 PID 型调速器,并有引入了加速度的 PID 型调速器和并联结构 PID 型调速器之区分,图 1-8 所示的微机调速器为 PID 型调速器,采用并联 PID 结构。

PI 型调速器能够为水轮机调节系统提供必要的稳定调节作用,可实现有差和无差调节,能够合理整定其调节参数,满足水轮机调节系统动态和静态的基本要求,但也存在欠缺,如引水系统的水流惯性时间常数 T_w 的值较大时,比例积分型调速器就难以保证调节系统的过渡过程的稳定性和动态品质指标;如比例积分型调速器在并网运行,参与调频调峰或电网频率要求更多地在动态过程减少频率偏差时,其瞬态响应性能较差,无法提高速动性能,且使调节对象的动态特性恶劣。

PID 型调速器具有比例积分微分调节规律,其微分环节的引入,使水轮机调节系统不仅按频率偏差进行控制,而且按频率偏差的加速度调节,因此在水轮机调节系统的过渡过程中,在扰动出现之初,频率偏差刚偏离规定值,频率偏差值很小,但此时频率偏差的变化速度相当大,此时可以提前加大调节信号,去改变导水机构的导叶开度。以上分析可知,采用微分环节可以使调速系统具有超前调节作用,具备预计功能,可使调节过程中最大频率偏差值减小,调节时间减少,有利于调速系统的稳定性,提高调节系统过渡过程品质,PID 型调速器适用于要求负荷调整速度较快,引水系统的水流惯性时间 T_w 较大和并网运行承担调频调峰任务的水轮发电机组。

3. 辅助接力器型、中间接力器型和并联 PID 型调速器

调速器一般由测量环节、整定环节、综合环节、放大环节、执行环节、校正环节和能源环节组成。根据各环节之间的信号传递、变换和综合的不同方式,可构成辅助接力器型、中间接力器型和并联 PID 型调速器。

图 1-6 所示为辅助接力器型调速器,从图中可见,发电机所生产电能的频率信号经频率测量环节(离心飞摆)测量频率并与给定频率进行比较,其偏差信号与外加的各种指令信号以及局部反馈信号、永态反馈信号和暂态反馈信号进行综合,其后,该信号经机械液压随动系统进行放大,通过主配压阀控制主接力器,推动笨重的导水机构,开大或关小导叶开度,从而调整水轮机出力,机调以及早期电调普遍采用这种系统结构,该系统结构的特点是综合

环节、第二级放大环节、暂态反馈环节与永态反馈环节形成调节规律,同时第二级放大环节具有驱动导水机构的作用。辅助接力器型调速器的静态特性、动态特性和非线性因素对调节规律影响较大。

图 1-9 所示为中间接力器型调速器,主要由电气控制器和电液随动系统两大部分组成,该系统结构的特点是由综合环节、第一级放大环节、暂态反馈环节和永态反馈环节形成调节规律,由配压阀和接力器组成液压放大装置组成的第二级放大环节进行功率放大并驱动导水机构,可见系统调节规律的形成与导水机构驱动的完成是独立的,在进行系统的维护、检修和调整时方便,但在第二级放大环节中存在机械反馈,安装调整困难,对系统动态特性有影响较大。

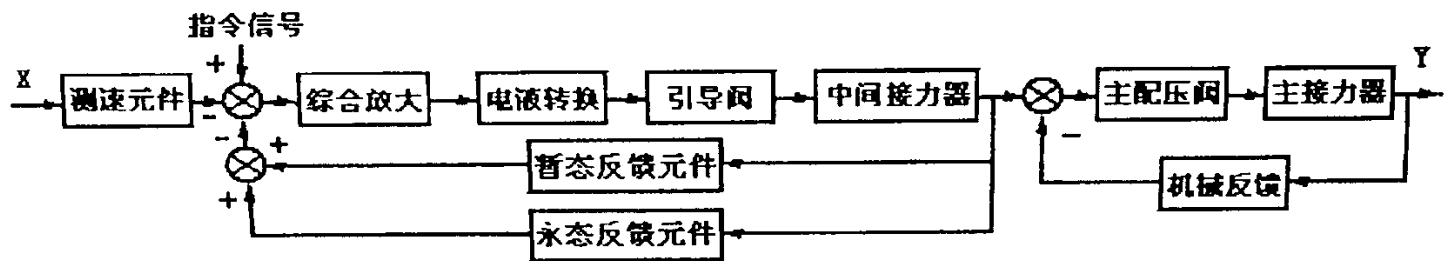


图 1-9 中间接力器型调速器

图 1-10 所示为并联 PID 型调速器,该系统结构的特点是测频环节经综合比较后由比例环节、积分环节、微分环节以及永态反馈环节构成的调节器形成调节规律,由电液随动系统或数液随动系统进行功率放大后驱动导水机构。后期的电调及微机调速器大多采用此种结构,该结构系统可靠,准确度和精确度高。

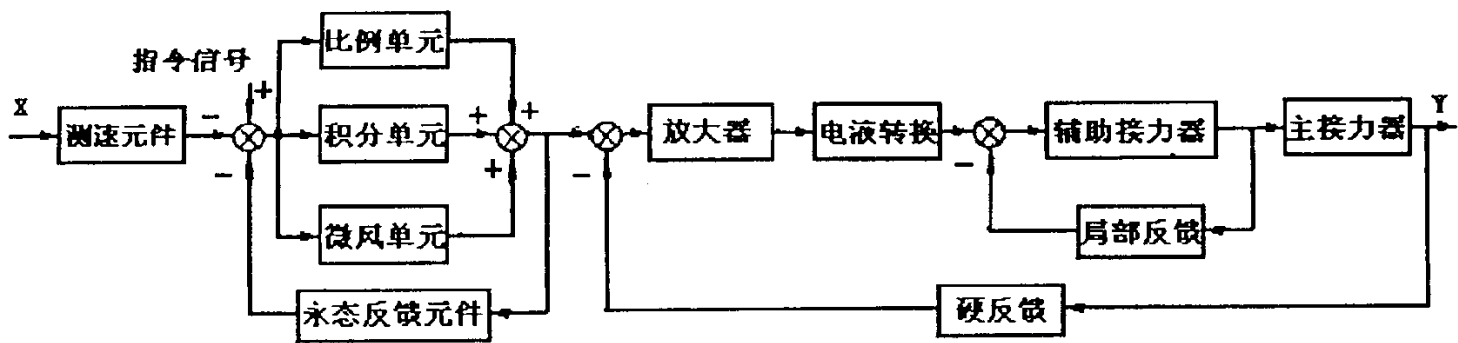


图 1-10 并联 PID 型调速器

4. 单调节调速器和双重调节调速器

调速器根据流量调节机构的类别不同可分为单调节调速器和双重调节调速器。

单调节调速器适用于混流式水轮机和定桨轴流式水轮机。

双重调节调速器适用于转桨式水轮机、冲击式水轮机或带调压阀的混流式水轮机。双重调节调速器运行时,调速器需要控制两个具有协调关系的执行机构,故必须具有双重调节作用。

图 1-11 所示为双重调节的调速器,该系统一般由主调节部分和协调节部分两大部分组成,主调节部分即为导叶调节部分,与单调节调速器基本相同;协调节部分即为桨叶调节部分,主要由协联函数发生器和电液随动系统组成,如转桨式水轮机的双重调节调速器的协

调节部分完成桨叶的叶片角度调整。

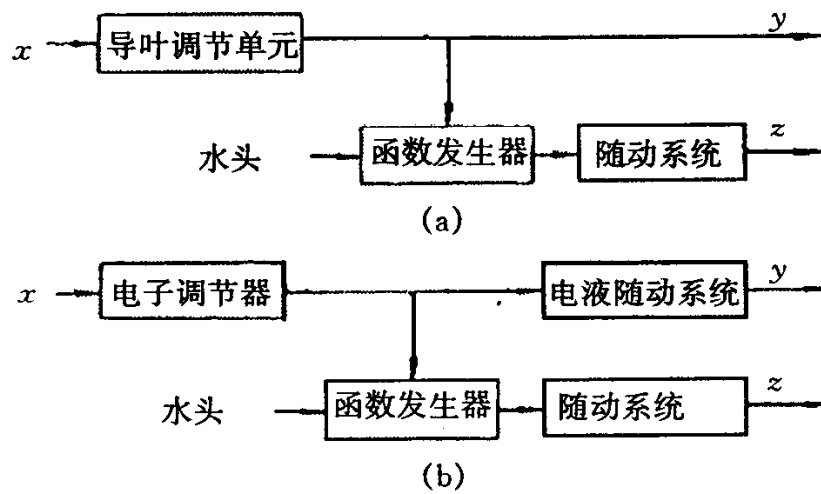


图 1-11 双重调节型调速器

双重调节调速器实现协联器装置经历了模拟协联至数字协联的发展,图 1-12(a)、(b)、(c)所示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。

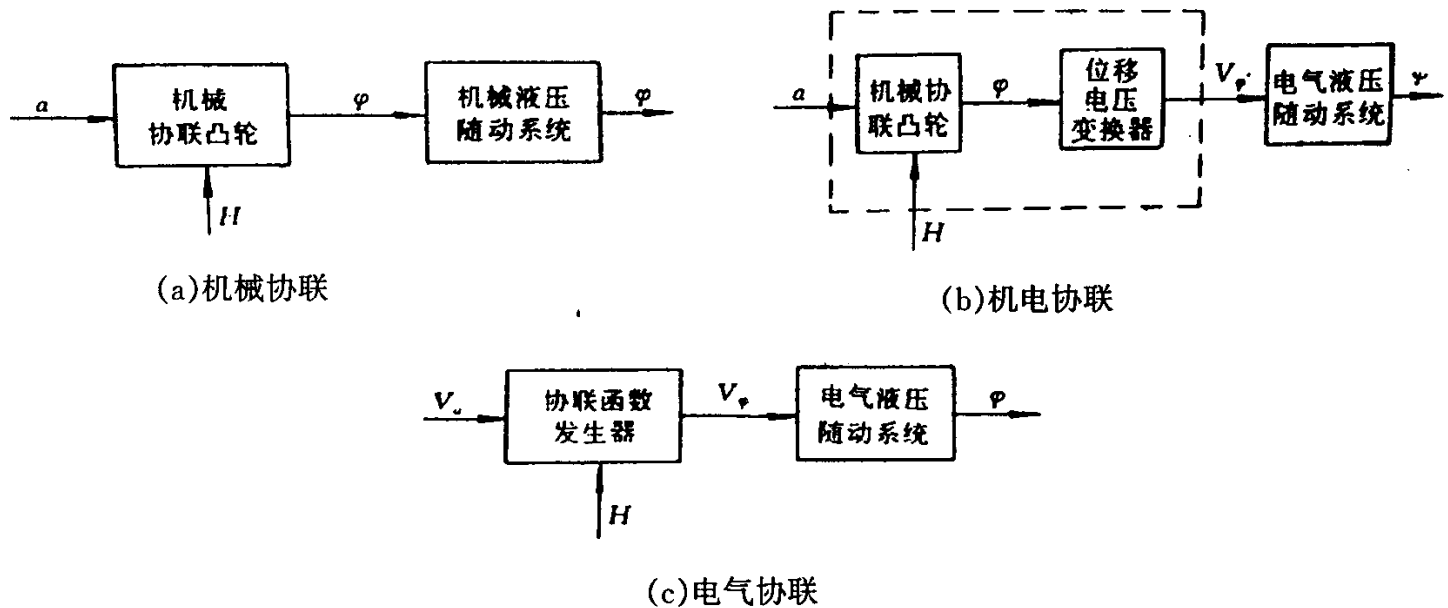


图 1-12 协联方式

5. 大型、中型和小型调速器

调速器根据其工作容量的大小,可分为大型、中型和小型调速器。

调速器的主配压阀直径在 80mm 以上的称为大型调速器,调速器的操作功在 10000~30000 NM 之间称为中型调速器,调速器的操作功在 10000 NM 及以下的称为小型调速器。

1.3.3 调速器作用

调速器的基本作用是调整转速、调整功率。具体主要有以下作用:

(1)能自动调节水轮发电机组的转速,使其保持在额定转速允许的偏差内运转,以满足

电网对频率质量的要求。

(2)能使水轮发电机组自动或手动快速起动、同期及并网,增减负荷,正常停机,紧急停机。

(3)当水轮发电机组在电力系统并列运行时,调速器能自动承担预定的负荷分配,使各机组能实现经济运行。

(4)能满足转桨式、冲击式水轮机双重协联调节的需要。

1.3.4 调速器发展

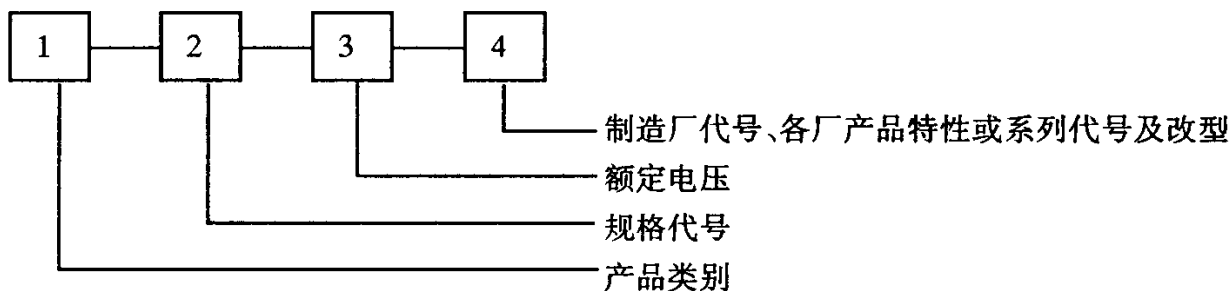
早期的调速器是蒸汽机调速器,是机械型,后来出现利用流速元件直接操作水轮机执行机构的直接作用式小型水轮机调速器。19世纪末出现了用液压伺服装置和液压放大器进行功率放大的液压调速器,20世纪30年代,机械液压调速器技术日臻成熟,随着晶体管在1948年的问世,经历了电子技术的飞速发展,出现了电气液压调速器。电气液压调速器发展早期,仅以部分电气回路代替了一些机械环节,后期出现并联PID型调速器,电液调速器才有独立模式。从采用元器件方面,其发展经历了电子管、晶体管、集成电路等发展阶段。从调节规律方面,由PI调节规律发展至今天广泛采用的PID调节规律。

随着计算机技术的普及和发展,水电厂采用计算机进行在线控制水平也日益提高,20世纪80年代我国投入微机调速器试运行,目前被新建水电厂广泛采用,已建大中型水电厂技术改造都考虑使用微机调速器,并且还在不停地更新换代,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、适应式变参数控制、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。

1.3.5 调速器型谱

1. 调速器产品型号的规定

调速器编制规定,由产品类别代号、规格代号、额定油压及制造厂代号四部分组成。各部分用横线分开,并按下列程序排列:



型号第一部分用字母表示调速器的基本特性和类型。

型号第二部分为数字,表示调速器的主要技术参数,如主配压阀直径、许用输油流量或接力器容量和配套机组功率等。对分离式结构的电液调速器,电气柜与液压柜型号表示相同。

型号第三部分表示额定油压,对分离私结构的电液调速器的电气柜,该部分可以省略。

型号第四部分为制造厂代号,表征该产品特性、系列代号及改型代号,由各厂自行规定。

若产品按统一设计图样生产,制造厂代号可省略,产品特性、系列代号及改型代号由产品技术归口单位规定。

2. 调速器的基本系列

表 1-1 所示为调速器按容量划分系列。

表 1-1 调速器容量划分系列表

类别	不带压力罐及 接力器调速器 ¹	带压力罐及接 力器的调速器 ¹	通流式 调速器	液压操作器	电动操作器	电子负荷调节器
系列	接力器容量范围(Nm)					配套机组功率 (kW)
大型	>30000					
中型	>10000~30000 ²	>10000 ~30000		>100130 ~30000	>10000 ~30000	
小型	>3000 ~10000 ²	>1500 ~10000		>3000 ~10000	>3000 ~10000	40,75,100
特小型	170~3000 ²	170~1500 ³	170~3000	170~3000	350~3000	3,8,18

注:1 系指调速器能配置的接力器容量。

2 系指单喷嘴冲击式水轮机调速器。

3 特小型不推荐采用电调。

1.4 水轮机调节的任务

1.4.1 电能生产的基本要求

1. 电力系统的负荷变化情况

电力系统的负荷是在不断变化的,存在着变化周期为几秒至几十分钟的负荷波动,这种负荷波动的幅值可达系统总容量的 2%~3%,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,这种负荷变化基本上是可预见的。但从低谷向高峰过渡的速度往往较快,如有的电力系统记录到每分钟负荷增加达系统总容量的 1%。电力系统负荷的不断变化必然导致系统频率的变化。

2. 供电可靠性

要保证所有发电设备运行可靠,并持续不断地向各类用户供电,一方面要求所有发电设备应安全可靠,不会因故障而退出运行,避免因停电引起生产的停顿,造成人民生活秩序的破坏,甚至影响人身安全,如手术台上的病人或电梯上的人员。另一方面,当用户用电量瞬间出现大量增减时,供电系统应能迅速增加或减少相应的出力,以适应用户需要,即采用积极的办法来保持供电系统本身的稳定性,保持供电系统能量平衡,保持发电设备运行工况的稳定,维持水电站生产过程系统运行参数的正常。尽可能避免消极的运行方式,如当供电系统供不应求时,采取切除某些次要用户用电的线路,以减少电力供应的方式,这是一种消极的保持系统能量平衡的运行方式。须知对次要用户停电所造成的损失也是难以估计的。