

现代水轮机调节技术

魏守平 / 著

华中科技大学出版社



现代水轮机 调节技术

魏守平 / 著

工业学院图书馆
藏书章

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代水轮机调节技术/魏守平 著
武汉:华中科技大学出版社, 2002 年 1 月
ISBN 7-5609-2569-3

- I. 现…
- II. 魏…
- III. 水轮机-调节-技术
- IV. TK730.7

现代水轮机调节技术

魏守平 著

责任编辑:谢燕群
责任校对:蔡晓璐

封面设计:潘 群
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社 武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学惠友科技文印中心
印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787×1092 1/16

印张:20.25

插页:2

字数:470 000

版次:2002 年 1 月第 1 版

印次:2002 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 7-5609-2569-3/TK·43

定价:45.00 元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书对现代水轮机调节技术的基本原理进行了简要的分析,对水轮机微机调速器,特别是 PLC 水轮机微机调速器的结构体系、硬件构成、软件设计、机械液压系统和水轮机调节系统的试验及故障对策等问题做了详细的论证和叙述。本书还收录了作者从事水轮机调节系统动态分析工作的成果。

本书可供从事水轮机调节技术的研究、开发、设计、生产、运行和教学工作的工程技术人员阅读和参考,也可作为水利水电工程等专业的本科生及研究生的教学参考书。

前 言

本书是作者 40 年来从事水轮机调节技术研究、开发、设计、生产、教学和标准化工作的一个回顾与小结,其中包含了 20 多年的理论研究和应用实践成果。

本书力求遵循并贯彻 GB/T9652.1—1997《水轮机调速器与油压装置技术条件》、GB/T9652.2—1997《水轮机调速器与油压装置试验验收规程》等国家标准,也参照了几家公司联合编制的企业标准 QB/T001 L—2001《水轮机数字式电液调速器技术条件》。

本书注意了理论与实践的密切结合。作为一种应用技术,对水轮机调节的基本理论和原理进行了简要的分析和阐述,对水轮机微机调速器,特别是 PLC 水轮机微机调速器的结构体系、硬件构成、软件设计、机械液压系统和试验及故障对策等问题做了详细的论证和叙述。希望本书能在理论与实际的结合上,引起读者的兴趣。

本书共分八章,其中第八章简要分析了武汉事达电气有限公司、武汉三联水电控制设备公司和武汉长江控制设备研究所等三个单位生产的 PLC 水轮机微机调速器产品。这些产品在国内外水电站中得到了广泛的应用,在很大程度上代表了我国 PLC 微机调速器的现状与水平。

魏守平撰写了一、二、三、四、六、七章和第八章的部分内容。为了增强本书的系统性,特邀高级工程师(教授级)吴应文撰写了第五章,高级工程师贾宝良、王党生和潘熙和撰写了第八章的部分内容。

高级工程师(教授级)李晃为本书提供了一些极有见地的观点和有价值的分析材料。高级工程师(教授级)饶培棠审阅了部分章节并提出了宝贵的意见。在此一并表示衷心的感谢。

作者还要感谢长沙星特自控设备实业有限公司、武汉星联控制系统工程有限责任公司、葛洲坝电厂能达通用电气股份合作公司、天津电气传动设计研究所、广东水利水电机械厂等单位对于本书有关工作的支持。

感谢从事 PLC 微机调速器研制的已毕业硕士研究生罗萍、梁方、唐涛南、吴浩洋、杨志荣、何飞跃、余岚和邓显文,他(她)们在 PLC 微机调速器的研究、设计和生产工作中做出了重要的贡献。

本书主要反映了作者的一些成果和观点,难免有片面甚至错漏之处,欢迎批评指正。

魏守平

于华中科技大学水电与数字化工程学院

2001 年 3 月 28 日



作者简介

魏守平，男，1939年2月生，湖北省武汉市人，华中科技大学教授、博士生导师，享受国务院特殊津贴。1962年毕业于原华中工学院工业自动化专业，1981年在该校获工学硕士学位。长期从事水轮机调节的研究、设计、生产、教学和标准化工作，曾在天津电气传动设计研究所和广西南宁发电设备总厂各工作了8年。参加了水轮机调速器国家标准、部标准和企业标准的制定工作；主持并完成了集成电路电液调速器、双微机调速器和PLC微机调速器的研究与开发工作，成果已转化为现实生产力，在国内外水电站得到广泛应用，曾获机械电子工业部科技进步二等奖。在国内外刊物上发表论文40多篇。现正从事基于现场总线的全数字微机调速器和水电站计算机控制设备及系统的研究、开发工作。

目 录

第一章 水轮机调节的基本概念	(1)
第一节 水轮机调节的任务	(1)
第二节 水轮机调节系统	(2)
第三节 水轮机调速器	(4)
第四节 水轮机调速器和水轮机调节系统的静态和动态特性	(8)
第二章 PLC 水轮机微机调速器	(22)
第一节 可编程控制器简介	(22)
第二节 PLC 水轮机微机调速器的结构	(24)
第三节 PLC 水轮机微机调速器微机调节器的自动调节分析	(36)
第四节 PLC 微机调节器的静态特性	(42)
第五节 PLC 微机调节器的动态特性	(54)
第六节 PLC 微机调节器的控制功能	(59)
第三章 PLC 微机调速器的硬件分析	(64)
第一节 用于水轮机微机调速器的可编程控制器	(64)
第二节 PLC 微机调速器的频率测量	(74)
第三节 PLC 微机调速器的开关量输出	(83)
第四节 PLC 微机调速器的开关量输入	(87)
第五节 PLC 微机调速器的模拟量接口	(88)
第六节 步进电机及其驱动器	(90)
第七节 交流伺服电机及其驱动器	(93)
第八节 触摸式图形显示操作终端	(99)
第九节 PLC 微机调节器的电源	(104)
第十节 PLC 微机调节器的框图	(106)
第四章 PLC 微机调速器软件设计及分析	(109)
第一节 可编程控制器的编程语言和编程软件包	(109)

第二节	PLC 微机调速器程序	(123)
第三节	特殊模块输入/输出	(127)
第四节	PLC 微机调速器的 PID 调节程序	(131)
第五节	调节模式和工作状态	(137)
第六节	给定值增加/减少程序	(141)
第七节	检错和故障诊断程序	(144)
第八节	编制 PLC 微机调速器程序应该注意的问题	(146)
第五章	微机调速器的机械液压系统	(149)
第一节	概 述	(149)
第二节	机械液压系统的主要部件及机构	(151)
第三节	微机调速器的机械液压伺服系统	(185)
第六章	水轮机调节系统的动态分析	(197)
第一节	水轮机调节系统的动态特性	(197)
第二节	调节对象的动态特性	(199)
第三节	刚性水锤下水轮机调节系统的状态方程	(203)
第四节	水轮机调节系统的综合主导极点配置	(211)
第五节	水轮机调节系统的相对稳定性分析	(221)
第六节	水轮机调节系统的描述函数分析	(226)
第七章	微机调速器的试验及故障处理	(234)
第一节	微机调速器的主要试验	(234)
第二节	水轮机调节系统试验数据的回归分析	(236)
第三节	正交试验方法与调节参数选择	(239)
第四节	微机调速器试验仪器	(245)
第五节	微机调速器故障分析及对策	(261)
第八章	典型 PLC 微机调速器分析	(266)
第一节	BW(S)T—STARS 步进式可编程微机调速器	(266)
第二节	W(S)T—J 型和 W(S)T—K 型可编程微机调速器	(273)
第三节	BW(S)T 型步进电机式可编程微机调速器	(279)
第四节	SLT 型全数字可编程微机组式调速器	(282)
第五节	DKT—80/100/150 型伺服电机控制式全可编程调速器	(286)
第六节	GLT—K 系列贯流式机组全可编程调速器	(293)

第七节	GYT—K 系列高油压中小型可编程调速器	(297)
第八节	DFT 系列电动阀控缸式可编程中小型水轮机调速器	(300)
第九节	WW(S)T 型 PLC 微机调速器	(307)
第十节	DZYWT 型直连式高油压中小型微机调速器	(313)
参考文献		(315)

第一章 水轮机调节的基本概念

第一节 水轮机调节的任务

水轮机是靠自然水能进行工作的动力机械。与其他动力机械相比,它具有效率高、成本低、能源可再生、不污染环境和便于综合利用等优点。绝大多数水轮机都用来带动交流发电机,构成水轮发电机组。这里所讨论的“水轮机调节”是指对构成水轮发电机组的水轮机的调节。

水轮发电机组把水能转变为电能供工业、农业、商业及人民生活等用户使用。用户在使用电过程中除要求供电安全可靠外,对电网电能质量也有十分严格的要求。按我国电力部门规定,电网的额定频率为 50Hz (赫兹),大电网允许的频率偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。对我国的中、小电网来说,系统负荷波动有时会达到其总容量的 5%~10%;而且即使是大的电力系统,其负荷波动也往往会达到其总容量的 2%~3%。电力系统负荷的不断变化,导致了系统频率的波动。因此,不断地调节水轮发电机组的输出功率,维持机组的转速(频率)在额定转速(频率)的规定范围内,就是水轮机调节的基本任务。

水轮发电机组转动部分的运动方程为:

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

式中:

J ——机组转动部分的惯性矩 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

$\omega = \frac{\pi n}{30}$ ——机组转动角速度 (rad/s);

n ——机组转动速度 (r/min);

M_t ——水轮机转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

M_g ——发电机负荷阻力矩 (负载转矩) ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

式 (1-1) 清楚地表明,机组转速(频率)保持恒值的条件是 $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 即要求 $M_t = M_g$,

否则就会导致机组转速(频率)相对于额定值升高或降低,从而出现转速(频率)偏差。

水轮机转矩

$$M_t = \frac{\rho Q H \eta_t}{\omega} \quad (1-2)$$

式中:

Q ——通过水轮机的流量 (m^3/s);

H ——水轮机净水头 (m);

η_t ——水轮机效率;

ρ ——水的密度 (kg/m^3)。

所以，在一定的机组工况下，只有调节流量 Q 和效率 η_t ，才能调节水轮机转矩 M_t ，达到 $M_t = M_g$ 的目的。从最终效果来看，水轮机调节的任务是维持水轮发电机组转速（频率）在额定值附近的允许范围内。然而，从实质上讲，只有当水轮机调节器相应地调节水轮机导水机构开度（从而调节水轮机流量 Q ）和水轮机轮叶的角度（从而调节水轮机效率 η_t ），使 $M_t = M_g$ ，才能使机组在一个允许的稳定转速（频率）下运行。从这个意义上讲，水轮机调节的实质就是：根据偏离额定值的转速（频率）偏差信号，调节水轮机的导水机构和轮叶机构，维持水轮发电机组功率与负荷功率的平衡。

水轮机调速器是水电站水轮发电机组的重要辅助设备，它与电站二次回路或计算机监控系统相配合，完成水轮发电机组的开机、停机、增减负荷、紧急停机等任务。水轮机调速器还可以与其他装置一起完成自动发电控制（AGC）、成组控制、按水位调节等任务。

第二节 水轮机调节系统

一、水轮机调节系统的结构

水轮机调节系统是由水轮机控制设备（系统）和被控制系统组成的闭环系统。水轮机、引水和泄水系统、装有电压调节器的发电机及其所并网的电网称为水轮机调节系统中的被控制系统；用来检测被控参量（转速、功率、水位、流量等）与给定量的偏差，并将其按一定特性转换成主接力器行程偏差的一些装置组合，称为水轮机控制设备（系统）。水轮机调速器则是由实现水轮机调节及相应控制的机构和指示仪表等组成的一个或几个装置的总称。

水轮机调节系统的结构如图 1-1 所示。其工作过程为：测量元件把机组转速 n （频率 f ）、功率 P_g 、水头 H 、流量 Q 等参量测量出来，与给定信号和反馈信号综合后，经放大校正元

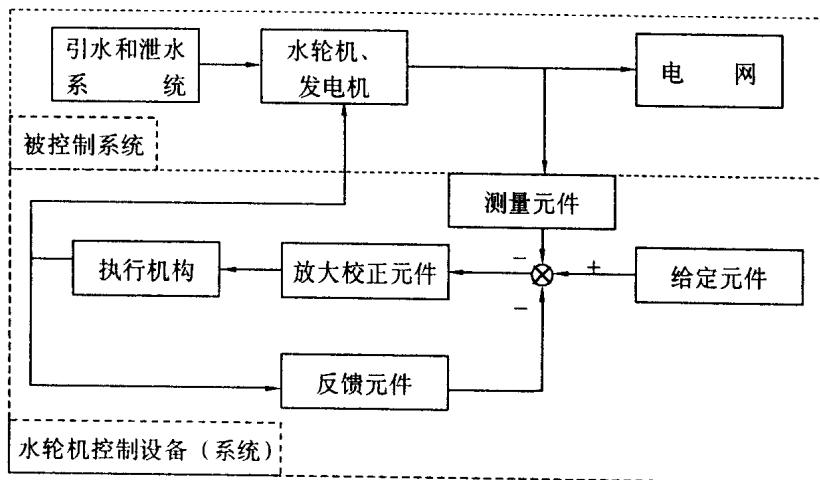


图 1-1 水轮机调节系统的结构图

件控制执行机构，执行机构操纵水轮机导水机构和桨叶机构，同时经反馈元件送回反馈信号至信号综合点。

二、水轮机调节系统的特点

水轮机调节系统是一个自动调节系统，它除了具有一般闭环控制系统的共性外，还有一些值得注意的特点：

① 水轮机控制设备是通过水轮机导水机构和桨叶机械来调节水轮机流量及其流态的，这种调节需要很大的动力，因此，即使是中小型调速器也大多要采用机械液压执行机构，且常常采用有一级或二级液压放大的液压执行结构。

② 水轮机过水管道存在着水流惯性，通常用水流惯性时间常数 T_w 来表述：

$$T_w = \frac{Q_r}{gH_r} \sum \frac{L}{A} = \sum \frac{Lv}{gH} \quad (1-3)$$

式中：

A ——每段过水管道的截面积 (m^2)；

L ——相应每段过水管道的长度 (m)；

v ——相应每段过水管道内的流速 (m/s)；

g ——重力加速度 (m/s^2)；

T_w ——水流惯性时间常数 (s)。

从自动控制理论的观点来看，过水管道水流惯性使得水轮机调节系统成为一个非最小相位系统，对系统的动态稳定和响应特性会带来十分不利的影响。通常所说的水锤效应（或水击效应）就是对这种水流惯性的一种形象的表述。

水流惯性时间常数 T_w 的物理概念是：在额定水头 H_r 作用下，过水管道内的流量 Q 由 0 加大至额定流量 Q_r 所需要的时间。

③ 水轮发电机组存在着机械惯性，可用机组惯性时间常数 T_a 来表述：

$$T_a = \frac{J_{\omega_r}}{M_r} = \frac{GD^2 \cdot n_r^2}{3580P_r} \quad (1-4)$$

式中：

J_{ω_r} ——额定转速时机组的惯性矩 ($kg \cdot m^2$)；

M_r ——机组额定转矩 ($N \cdot m$)；

GD^2 ——机组飞轮力矩 ($kN \cdot m^2$)；

n_r ——机组额定转速 (r/min)；

P_r ——机组额定功率 (kW)；

T_a ——机组惯性时间常数 (s)。

机组惯性时间常数 T_a 的物理概念是：在额定力矩 M_r 作用下，机组转速 n 由 0 上升至额定转速 n_r 所需要的时间。

④ 水轮机调节系统是一个复杂的、非线性控制系统。

● 水轮机型式多种多样：混流式、轴流定桨式、轴流转桨式、贯流式、冲击式、水泵/水轮机式等等；

- 水轮机特性是非线性的；
- 水轮发电机组有多种工作状态：机组开机、机组停机、同期并网前和从电网解列后的空载、孤立电网运行、以转速控制和功率控制并列于大电网运行、水位和/或流量控制等。

三、手动水轮机调节

水电站值班人员手动控制水轮机导水机构时，必须监视被控制的水轮发电机组的转速（频率）或电网的频率。当频率大于或小于 50Hz 时，则相应地关闭或开启水轮机导水机构，使频率回复到 50Hz 左右的一个允许的范围内。

由于被控机组具有水轮机过水管道的水流惯性和水轮发电机组的机械惯性，因此在手动调节时运行人员必须掌握下列操作原则：

1. 比例操作原则

操作导水机构的幅度和速度应近似比例于机组转速（频率）对额定转速（50Hz）的偏差。例如：机组频率若为 51Hz 和 54Hz，虽然它们均大于 50Hz，但针对前者，关闭导水机构的幅度可小一点、速度可慢一点；而对后者，则幅度要大一点、速度要快一点。

2. 超前操作原则

操作中不仅要密切观察机组转速（频率）偏离额定值的情况，而且要注意机组转速（频率）向额定值回复的速度。例如：当机组频率由 54Hz 以较快的速度下降到 51Hz 时，虽然它仍然大于 50Hz，但此时不应继续关闭导水机构，而应使导水机构稍开启一点。只有这样才有可能使机组转速（频率）较快地回复到额定值附近。这种针对水流惯性和机组惯性而采取的超前操作原则被形象地称之为“提前刹车”。

上述比例、超前操作原则，可以通俗地理解为自动调节时的“比例”和“微分”调节规律。自动调节中的“积分”调节规律，则起着消除或减小静态偏差、形成水轮机调速器和水轮机调节系统静特性的作用。可以称积分规律起到“精细”调节的作用。

第三节 水轮机调速器

水轮机调速器是由实现水轮机调节及相应控制的机构和指示仪表等组成的一个或几个装置的总称，它是水轮机控制设备（系统）的主体，它可分为机械液压调速器、电气液压调速器和数字式电液调速器等几种，数字式电液调速器又常称为微机调速器。

一、机械液压调速器

1. 机械液压调速器的定义

测速、稳定及反馈信号用机械液压的方法产生，经机械液压综合后通过液压放大部分驱动水轮机接力器的调速器，称为机械液压调速器。

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，面临大机组、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，机械液压调速器固有的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露出明显的缺陷。现在，新建的大型水轮发电机组几乎均不采用机械液压调速器，只有中小型机组特别是小型机组仍有相当一部分采用机械液压调速器。

2. 机械液压调速器的结构方块图

机械液压调速器的结构种类甚多，下面有选择地给出了两种典型的机械液压调速器结构方块图。

① 主接力器反馈、取速度信号、有暂态反馈的 PI（比例-积分）调速器（图 1-2）。常称为缓冲型调速器。

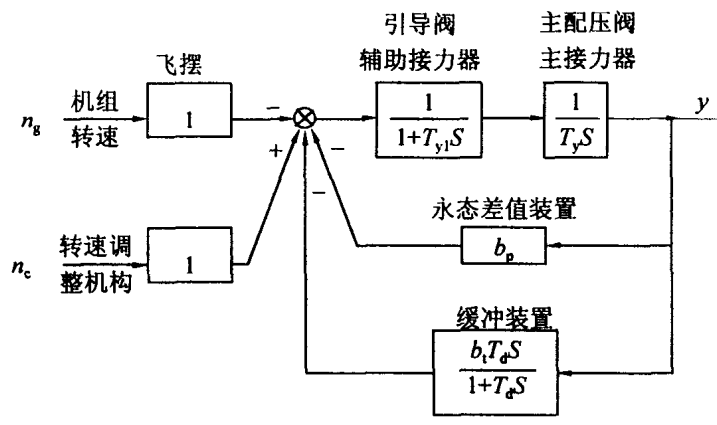


图 1-2 机械液压调速器结构方块图 1

② 中间接力器反馈、取速度信号、有暂态反馈的 PI（比例-积分）调速器（图 1-3）。

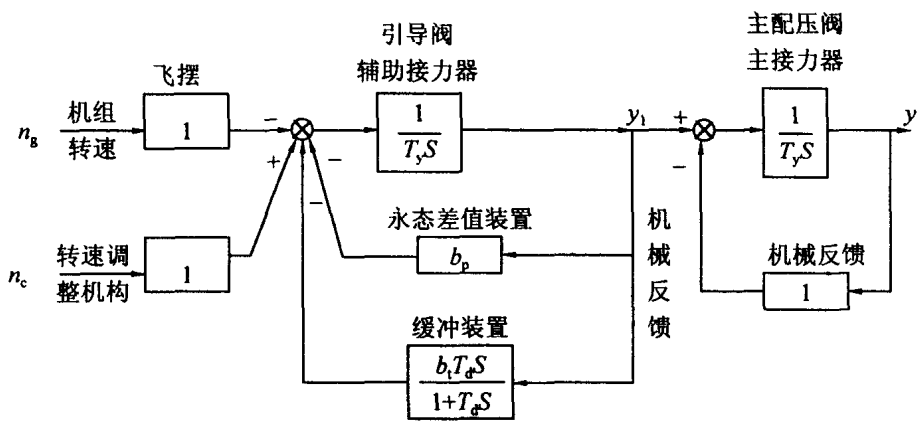


图 1-3 机械液压调速器结构方块图 2

图 1-2 和图 1-3 中参数的含义：

T_{y1} ——辅助接力器或中间接力器反应时间常数 (s);

T_y ——主接力器反应时间常数 (s);

b_p ——永态差值系数;

b_t ——暂态差值系数;

T_d ——缓冲装置时间常数 (s);

S ——拉普拉斯算子。

其定义及概念将在有关章节叙述。

二、电气液压调速器^[4, 5]

1. 电气液压调速器定义

测速、稳定及反馈信号用电气方法产生，经电气综合、放大后通过电气液压放大部分驱动水轮机接力器的调速器，称为电气液压调速器。

20 世纪 50 年代以后，电气液压调速器获得了较广泛的应用。从采用的元件来看，它又经历了电子管、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，现在很少有生产电气液压调速器的厂家了。

2. 电气液压调速器的结构

以图 1-4 所示的结构作为一个典型例子，图中符号含义同图 1-2 和图 1-3 的。

比较图 1-3 和图 1-4 不难看出，它们具有相同的系统结构，在图 1-4 所示的系统中仅仅用了下列电气环节取代图 1-3 所示的相应机械液压环节：

- ① 电气频率测量环节取代飞摆测速装置；
- ② 电气频率给定环节取代转速调整机构；
- ③ 放大环节和电液转换器取代引导阀并完成电气信号至机械液压信号的转换；
- ④ 电气永态差值环节取代机械永态差值装置；
- ⑤ 电气缓冲环节取代机械液压缓冲装置；

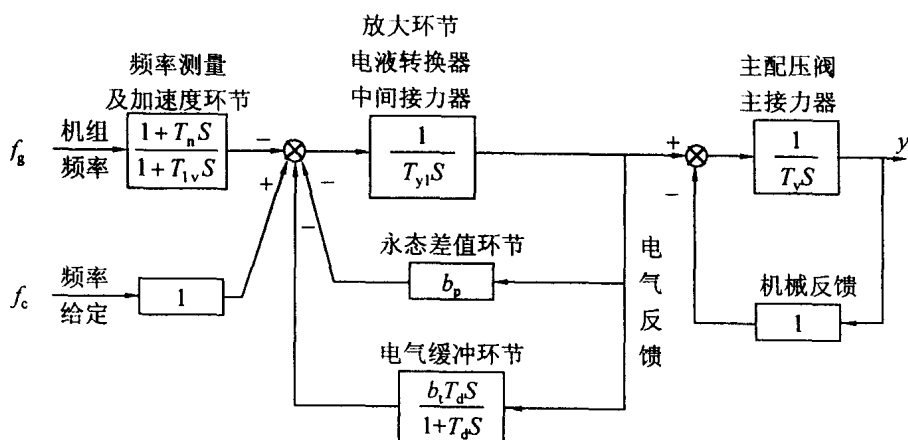


图 1-4 电气液压调速器(PID)结构图

⑥ 由中间接力器引出的电气反馈取代由中间接力器引出的机械反馈。

三、数字式电液调速器

随着 1971 年微处理机的问世, 世界各国在 20 世纪 80 年代初都开始研制微机(液压)调速器。华中科技大学(原华中工学院)在国内率先研制成功了适应式变参数微机调速器, 于 1984 年 11 月在湖南欧阳海水电站进行了试验并投入运行^[6, 7]。其后又与有关单位合作, 开发生产了双微机单调节微机调速器和双微机双调节微机调速器, 据不完全统计, 已有 100 多台产品在水电站运行。

针对自行研制开发的微机系统存在着由非计算机专业人员设计和生产、批量过少而导致可靠性不高的问题, 华中科技大学又与有关单位合作, 1993 年率先提出并完成了可编程控制器(液压)调速器的开发和生产^[8], 至 2000 年底, 据不完全统计已有近 600 台可编程控制器(液压)调速器在国内外水电站运行, 成为我国当前水轮机微机调速器的微机调节器主导产品。

从 2000 年下半年开始, 华中科技大学已开始研制新一代的水轮机微机调速器的微机调节器——基于现场总线的全数字微机调节器。显然, 随着微机技术、网络技术、总线技术的发展, 水轮机微机调速器的微机调节器将会得到不断的完善和发展。

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。

图 1-5 所示为一种微机调速器的结构图。

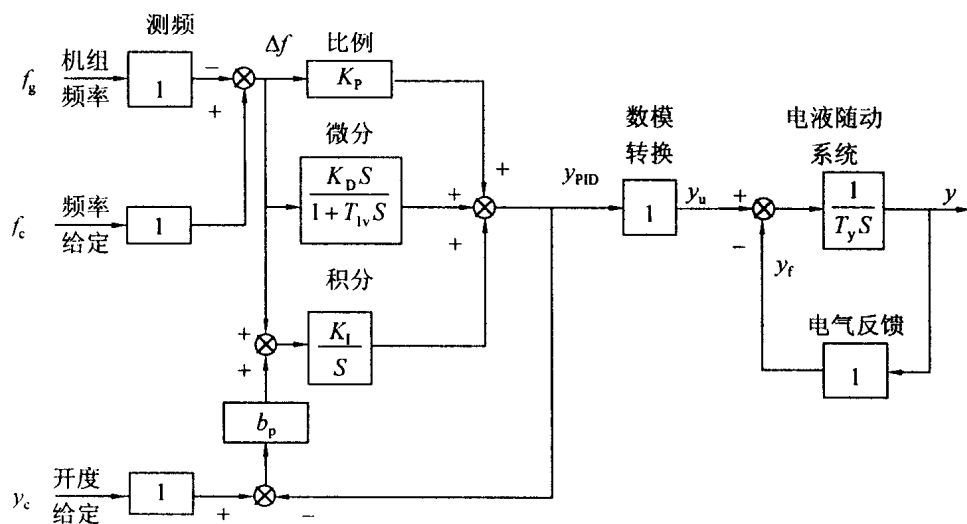


图 1-5 微机调速器结构图

图 1-5 中:

f_g ——机组频率 (Hz);

f_c ——频率给定 (Hz);

y_c ——开度给定相对值;
 K_p ——比例增益;
 K_D ——微分增益 (s);
 K_I ——积分增益 (s^{-1});
 T_{Iv} ——微分环节时间常数 (s)。

第四节 水轮机调速器和水轮机调节系统的静态和动态特性

水轮机调节系统在工作过程中, 有两种工作状态: 静态 (稳态) 和动态 (暂态)。调节系统的静态又称为稳定状态, 是指机组在恒定负荷、给定信号和水头下运行, 水轮机调节系统的所有变量都处于平衡状态的运行状态。当调节系统受到负荷、水头等扰动作用, 或给定信号变化时, 调节系统将出现相应的运动, 经过一段时间后, 在新的条件下进入了新的稳定状态。从原稳定状态到新稳定状态的运动过程就称为水轮机调节系统的动态。在实际运行中, 水轮机调节系统的稳定状态是相对的、暂时的, 其动态则是绝对的、长期的。

一、水轮机调节系统的国家标准^[1~3]

水轮机调速器和水轮机调节系统应遵循的国家标准如下:

① GB/T9652.1—1997《水轮机调速器与油压装置技术条件》, 开始实施日期是 1998 年 4 月 1 日。

② GB/T9652.2—1997《水轮机调速器与油压装置试验验收规程》, 开始实施日期是 1998 年 4 月 1 日。

③ GB/T8191—95《水轮机调速器与油压装置术语》。

此外, 还可以参照下列国际标准:

- 《水轮机控制系统规范导则》IEC61362。
- 《水轮机调速系统试验规范》IEC60308 (征求意见稿)。

二、水轮机调节系统静态特性

当给定信号恒定时, 水轮机调节系统处于平衡状态, 被控参量偏差相对值与接力器行程相对值的关系如图 1-6 所示。在工程实际中, 有时也采用图 1-7 所示的静态特性图——将图 1-6 所示的被控参量偏差相对值改用被控参量绝对值表示。

图 1-6 和图 1-7 中:

$x_f = \frac{f_g}{f_r}$ —— 机组频率的相对值;

$f_g = \frac{pn}{60}$ —— 机组频率 (Hz);