

SHUILUNJI TIAOJIE XITONG YINGYONG JI
CESHI JISHU

水轮机调节系统应用及 测试技术

贵州电网有限责任公司 组编

非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水轮机调节系统应用及 测试技术

贵州电网有限责任公司 组编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书系统阐述了水轮机调节系统应用及测试技术,结合多年现场调试、技术服务经验,以及调节系统一次调频、功率模式运行、孤网运行等科研成果,系统地讲述了水轮机调节系统在水电厂的应用及测试技术。

本书前3章主要介绍了水轮机调节系统的基础知识,作为工程调试人员必备的基础知识,内容紧密结合现场,以实际应用为主;后6章分别讲述了调节系统现场应用技术及测试技术,并加入了大量实测数据及案例,包括功率模式、入网调整试验方法、频率控制技术、参数测试与建模、孤网运行控制、常见故障分析等内容。

本书适用于从事水电机组调节系统试验、调试的技术人员阅读,也可供水电厂调速器维护检修人员及高等院校相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水轮机调节系统应用及测试技术 / 贵州电网有限责任公司组编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019. 4
ISBN 978-7-5170-7624-7

I. ①水… II. ①贵… III. ①水轮机—调节系统
IV. ①TK730.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第074504号

书 名	水轮机调节系统应用及测试技术 SHUILUNJI TIAOJIE XITONG YINGYONG JI CESH I JISHU
作 者	贵州电网有限责任公司 组编
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、68545874 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.25印张 314千字
版 次	2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	65.00元

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

本书编委会

主 编 沈春和

副主编 毛 成 苏 立 陈满华

参编人员 李林峰 刘卓娅 刘冬莉 陈 晖 曾癸森



本书是贵州电网有限责任公司电力科学研究院水机所从事水轮机调节系统试验、调试、研究工作的总结，特别是近十年，贵州乌江流域和北盘江流域一批大型水电机组陆续投产，在大量的调试工作和机组检修试验工作中积累了丰富的实践经验。

本书在编写过程中力求贯彻《水轮机控制系统技术条件》(GB/T 9652.1—2007)、《水轮机控制系统试验》(GB/T 9652.2—2007)、《水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》(DL/T 496—2016)、《水轮机电液调节系统及装置技术规程》(DL/T 563—2016)、《南方电网同步发电机原动机及调节系统参数测试与建模导则》(Q/CSG 1206002—2015)等标准，注重实用性及应用性。书中选取的内容都是水轮机调节系统调试、试验人员面临的主要技术。为了更好地指导实践工作，书中给出了部分实测数据及案例，供工程技术人员参考。

我国的水力资源丰富，21世纪水电建设事业出现了前所未有的发展势头，水电机组的装机数量和容量都不断增大。《中国电力行业年度发展报告2018》显示：2017年华中区域水电装机容量占比为42.6%，南方区域水电装机容量占比为37.9%。水电能源是电力系统的重要组成部分，对水电站综合自动化系统中的关键设备提出了更高的要求。水电机组的稳定运行直接影响着整个电力系统的稳定运行。

水轮机调节系统是水电站重要的基础自动化设备。随着清洁能源调度比重的增加，水电在电力系统中已占相当的比重，因此对水电机组电能的品质及机组运行的安全可靠提出了更高的要求，如更高的可靠性、更完美的控制功能，这就要求调速器具有更大的灵活性、通用性和可靠性；机组空载运行时，调节发电机组的频率；机组并网运行时，调节系统调节机组输出的有功功率；电网发生故障使某些机组跳闸时，调节系统可以使备用机组迅速启

动、升速和并网，保证电力系统稳定运行。其作用非常重要，一直是电力系统自动控制的重要内容之一。

在微机调速器出现、发展、完善和广泛应用的同时，水电站发电控制系统、电网发电调节自动化系统已日趋成熟，电网容量迅速扩大。大、中型和多数小型水轮发电机组的主要运行方式是并入大的区域电网运行。控制这些机组的水轮机微机调速器则是通过水电站 AGC 系统受控于电网发电调度系统，基本并网运行方式为一个机组功率控制器。电网的发电负荷调整及分配、电网调频任务主要由电网发电调度系统完成，微机调速器仅仅是它的末端控制器。长时间的大网运行，导致对调速器认识产生了麻痹思想，有些机组调速器甚至不具备孤网运行模式。

随着电网容量的增大，电网的安全稳定越来越重要，大电网出现跨网事故依然有发生的可能性。自 20 世纪 70 年代以来，因为电压失稳、频率波动及扰动、低频振荡等因素而导致电网瓦解的事故在国内外多次发生，导致了长时间大面积的停电，其中以 2003 年美加大停电事故最为引人瞩目。20 年来我国发生过的大停电事故也超过 100 起，造成了巨大的经济损失。

我国能源生产和消费面临转型，构建新一代电力系统已经开始。新一代电网的主要特征是高比例可再生能源接入、具有高比例电力电子装备、支撑多能互补综合能源网，以及与信息通信技术进一步深度融合。大量风力发电、太阳能发电的接入，系统惯性减小造成频率波动和频率稳定问题。在通信、频率调节等方面会有更高的要求，应更加重视源网协调，调速系统也要适应新一代电网的发展。应更加重视水轮机调节系统的试验及调试工作。

本书共分为 9 章，前 3 章主要介绍了水轮机调节系统的基础知识，作为工程调试人员必备的基础知识，内容紧密结合现场，以实际应用为主；后 6 章分别讲述了调节系统现场应用技术及测试技术，并加入了大量实测数据及案例。

第 1 章水轮机调节系统概述，介绍了水轮机调节系统的组成、任务、分类、特点以及现代电力系统对水轮机调节系统的要求；第 2 章水轮机调节系统控制技术，介绍了水轮机调节系统主要技术参数，微机调速器频率测量的方法原理及要求，PID 动态特性及控制算法，运行方式、运行工况及调节模式；第 3 章水轮机控制系统结构，从电气及机械两方面对实际应用的主流结构分别进行了介绍；第 4 章水轮机调节系统功率模式，介绍了功率模式的基本原理、

改造方法、试验方法、功率模式和开度模式的比较分析；第5章水轮机调节系统入网调整试验方法，介绍了试验的内容及相关规定，以及各阶段试验方法；第6章水电机组调节系统频率控制技术，介绍了调频的原理，一次调频原理、实现方法、技术要求、试验方法及故障诊断，以及水轮机调节系统在二次调频中的作用；第7章水轮机调节系统参数测试与建模，介绍了水轮机调节系统模型、建模及参数辨识方法，模型参数现场试验方法及基于 PSD - BPA 及 Matlab 软件模型参数辨识方法；第8章水电机组调节系统孤网运行控制，介绍了水电机组调节系统孤网运行控制策略、孤网运行参数、多机组小网运行协调控制、调节系统油压装置储能试验；第9章水轮机调节系统常见故障分析，介绍了故障处理的基本要求、故障分类、容错方式，常见故障分析、处理方法及实际故障案例。

感谢以下与作者合作过的科研单位、水轮机调速器生产厂家和水电厂：四川大学、华中科技大学、中国水利水电科学研究院、北京中水科水电科技开发有限公司、武汉三联水电控制设备有限公司、长江三峡能事达电气股份有限公司、南京南瑞水电控制设备有限公司、洪家渡水电厂、东风水电厂、索风营水电厂、乌江水电厂、构皮滩水电厂、思林水电厂、沙沱水电厂、光照水电厂、马马崖水电厂、董箐水电厂、引子渡水电站、普定水电站、善泥坡水电站、红枫水力发电厂、平寨水电站、象鼻岭水电站、大花水电站。感谢多年和作者一起从事水轮机调节系统研究和试验工作的各位专家、同事、各单位工程技术人员在工作中的支持和合作。

鉴于作者对于水轮机调节系统技术理解的局限性，书中难免会有不当之处，恳请同行不吝赐教。希望本书能够对水轮机调节系统的应用和测试工作，对电网的安全稳定运行起到积极的作用。

编者



目 录

MULU

前言

第 1 章 水轮机调节系统概述	1
1.1 水轮机调节系统的组成	1
1.2 水轮机调节系统的任务及特点	2
1.3 水轮机控制系统的分类及其特点	4
1.4 现代电力系统对水轮机调节系统的要求	8
第 2 章 水轮机调节系统控制技术	10
2.1 水轮机调节系统的主要技术参数	10
2.2 微机调速器的频率测量	18
2.3 微机调速器的 PID 计算	21
2.4 水轮机调节系统的运行方式及流程	32
2.5 微机调速器的运行工况及调节模式	36
第 3 章 水轮机控制系统结构	40
3.1 微机调速器的总体结构	40
3.2 微机调速器的电气结构	40
3.3 微机调速器的电液随动系统	44
3.4 微机调速器的典型布置结构	51
3.5 油压装置	54
第 4 章 水轮机调节系统功率模式	56
4.1 概述	56
4.2 功率模式的基本原理	57
4.3 调节系统增加功率模式改造方法	59
4.4 功率模式试验	64
4.5 调节系统功率模式和开度模式比较分析	69
第 5 章 水轮机调节系统入网调整试验方法	75
5.1 概述	75
5.2 调整试验的内容及相关规定	75

5.3	静态试验	77
5.4	空载试验	86
5.5	带负荷试验	93
第 6 章	水电机组调节系统频率控制技术	100
6.1	概述	100
6.2	一次调频原理	104
6.3	一次调频的相关技术要求	108
6.4	一次调频的性能测试	110
6.5	一次调频的故障诊断与性能调整	115
6.6	水轮机调节系统在二次调频中的作用	120
第 7 章	水轮机调节系统参数测试与建模	124
7.1	概述	124
7.2	水轮机调节系统模型	124
7.3	水轮机调节系统建模及辨识方法	137
7.4	水轮机调节系统模型参数现场试验	148
7.5	基于 PSD-BPA 及 Matlab 软件模型参数辨识方法	159
第 8 章	水电机组调节系统孤网运行控制	170
8.1	概述	170
8.2	水电机组调节系统孤网运行控制策略	170
8.3	孤网运行参数	173
8.4	多机组小网运行协调控制	178
8.5	调节系统油压装置储能试验	180
第 9 章	水轮机调节系统常见故障分析	182
9.1	概述	182
9.2	常见故障分析及处理方法	184
9.3	故障案例	191
	参考文献	199

第 1 章 水轮机调节系统概述

我国的水力资源丰富，水电是电力系统的重要组成部分。21 世纪，水电建设事业出现了前所未有的发展势头，水电机组的装机数量和容量都不断增大，对水电站综合自动化系统中的关键设备提出了更高的要求。水机组在电网中所占比重越来越大，水机组的稳定运行直接影响着整个电力系统的稳定运行。

水轮机调节系统是水电站重要的基础自动化设备。水轮机调速器是水机组两大调节设备之一，它不仅起调速作用，也承担了水机组的各种工况转换和频率、功率、相角等的控制以及保护水轮发电机组的任务。

随着水机组数量及单机容量的不断增加，以及清洁能源调度比重的增加，水电在电力系统中已占有相当的比重，因此对水机组电能的品质及机组运行的安全可靠提出了更高的要求，如更高的可靠性、更完美的控制功能以及报警、显示等附加功能，这就要求调速器具有更大的灵活性、通用性和可靠性；机组空载运行时，调节发电机组的频率；机组并网运行时，调节系统调节机组输出的有功功率；电网发生故障使某些机组跳闸时，调节系统可以使备用机组迅速启动、升速和并网，保证电力系统稳定运行。其作用非常重要，因此一直是电力系统自动控制的重要内容之一。

1.1 水轮机调节系统的组成

水轮机调节系统是由水轮机控制系统和被控系统组成的闭环系统。

水轮机控制系统也称水轮机调节装置，为实现水轮机调节及相应控制作用而设置的电子（电气）组件、机械液压组件、控制机构及指示仪表的组合。一般包括调节器、随动装置、油压装置、分段关闭组件、快速/紧急事故停机组件等。其基本功能为测量和监视水机组的被控参量，如转速、功率、水位、流量等，将测量值与目标值（预期值或给定参量）的偏差按一定特性转化为控制信号，并放大该信号，产生主接力器动作以削减这种偏差，从而实现水机组的转速调节或输出功率调节，并能执行机组启动、并网、停机、快速事故停机、紧急事故停机等操作，有时也用于水位或流量的调节。以实现转速调节为主要目的的水轮机调节装置称为水轮机调速器，简称调速器。

被控系统包括水轮机、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。由于水轮机及引水系统的多样性、差异性与水力特性的复杂性、多变性，使得被控系统具有非线性、参数时变等特性，它属于非最小相位系统，在研制与分析水轮机调节系统时，应注意被控制系统的这一特性。

由于负荷不断变化，水轮机调节也要不断进行，为此绝大多数电站都装有能自动进行水轮机调节的调速器。调速器有多种类型，但一般是由测量元件、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。水轮机调节系统结构如图 1-1 所示。

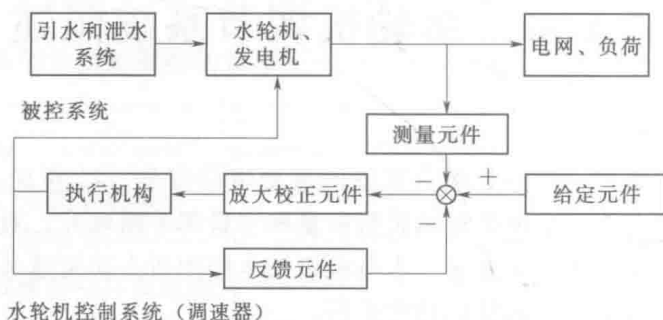


图 1-1 水轮机调节系统结构图

1.2 水轮机调节系统的任务及特点

1.2.1 水轮机调节系统的实质

水电机组转动部分的运动方程为

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

其中

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

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

ω ——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) 表明，水电机组是转速对力矩的积分环节，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）相对于额定值持续升高或降低，从而出现转速（频率）偏差；水电机组转速对力矩是一个一阶惯性环节。

水轮机转矩为

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

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， g/m^3 。

由式 (1-2) 可知，在一定的机组工况下，只有当水轮机调节器相应地调节水轮机导



叶机构开度（从而调节水轮机流量） Q 和水轮机桨叶的角度（从而调节水轮机效率），使 $M_t = M_g$ 时，才能维持水电机组发电功率与负荷功率的平衡，才能使机组在一个允许的额定转速（频率）下运行。因此，水轮机调节的实质就是根据转速偏离额定值的偏差信号调节水轮机导叶机构开度和水轮机桨叶的角度使 $M_t = M_g$ ，维持水电机组发电功率与负荷功率的平衡。

1.2.2 水轮机调节系统的任务

水轮机调节系统的基本任务可分为频率（转速）调节、有功功率调节和工况调节。

频率（转速）调节的任务是离网时控制发电机组处于空载状态，维持机组频率在额定频率附近，跟踪电网频率，使机组尽快同期、并网运行。并网时作为电网的频率调节器，在大网中完成电网一次调频任务，小网或孤网中保持电网频率在额定频率附近。

有功功率调节主要指并入大网运行时按照电网自动发电控制（AGC）系统的指令完成功率调节，满足电网二次调频的要求。

工况调节指完成被控机组的开机、停机、空载、孤立电网运行、增减负荷、一次调频、二次调频等多种工作状态转换，包括甩负荷、紧急停机等任务。

1.2.3 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，除了具有一般闭环控制系统的共性外，从自动控制角度来说，还有以下几个特点。

1. 水轮机引水系统存在水流惯性

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。

在动态过程中，当水轮机导叶关闭时，调节目标是减小水轮机力矩，但是由于引水系统水流减速、水流动能转变为势能、水轮机工作压力短时上升，导致水轮机力矩有短时段的增大；反之，当水轮机导叶开启时，调节目标是增大水轮机力矩，但是由于引水系统水流加速而导致水轮机压力短时降低，导致水轮机力矩有短时段的减小。所以，当水轮机导叶开启或关闭开始时刻，都会产生与控制目标相反的逆向调节。随着水轮机导叶开启或关闭速度的增大，动态过程中的逆向调节增强，对系统的动态稳定和响应特性会带来十分不利的影

响。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

2. 水电机组存在机械惯性

机械惯性可用机组惯性时间常数 T_a 来表达，这种惯性使得动态过程缓慢，调节系统容易出现振荡和超调。

机组惯性时间常数 T_a 的物理意义为在额定转矩 M_r 的作用下，机组从转速为零加速到额定转速 n_r 所需要的时间，是机组在转动中惯性大小的量度。机组惯性时间常数 T_a 在数值上为机组在额定转速时的动量矩与额定转矩之比。

3. 水轮机调节系统的复杂非线性

水轮机的型式多种多样，有混流式、轴流定桨式、轴流转桨式、贯流式等。不同的机组型式使得被控系统的特性及功能要求差异很大。

同一机组在不同的运行水位（包括库水位和尾水位）的机组特性不同，尤其是一洞多机、长引水道的机组，其特性更复杂。

水电机组在电力系统中承担调频、调峰和事故备用等多种任务；存在如机组开机、停机、空载、孤立电网、一次调频、二次调频等多种工作状态。

1.3 水轮机控制系统的分类及其特点

调速器可按照主要元件的自动化程度、随动系统类型、容量、执行机构的数量等进行分类。

1.3.1 按主要元件的自动化程度划分

1. 机械液压型调速器

机械液压型调速器即稳态、测速及反馈信号通过机械方法产生，经机械综合后通过液压放大产生信号驱动水轮机接力器的调速器。机械液压型调速器系统框图如图 1-2 所示。

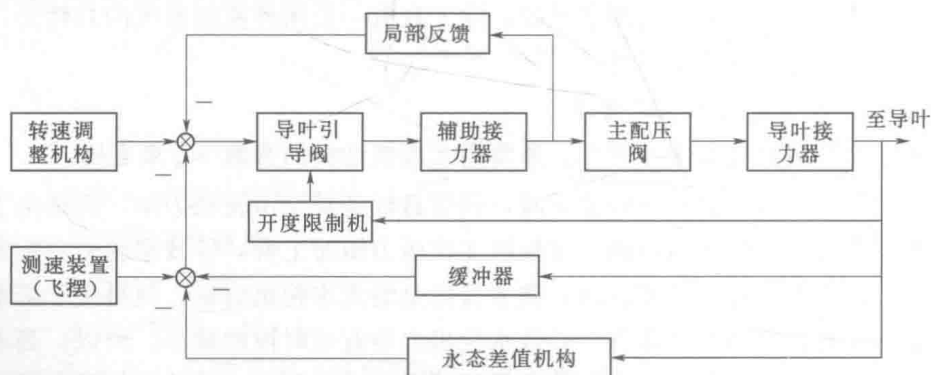


图 1-2 机械液压型调速器系统框图

图 1-2 中的测速装置采用离心飞摆利用机械部件转动的方式检测转速偏差，该偏差可以转换成相应机件的输出位移。

2. 电气液压型调速器

电气液压型调速器的系统框图和机械液压型的系统框图几乎一样，只是采用机械测速、反馈和调节部分代之以电气环节。电气液压型调速器系统框图如图 1-3 所示。

对比图 1-2 和图 1-3 可以看出，除了电气液压型调速器采用了电气环节代替了机械液压型调速器测量等一些环节之外，其他环节都相同。20 世纪 60 年代以后，电气液压型调速器也经过了一系列的改进，主要经历了电子管、磁放大器、晶体管、集成电路等几个阶段的发展。到了 20 世纪 80 年代后期，由于微机控制技术的崛起，机械液压型和电气液压型调速器逐渐退出历史舞台，取而代之的是微型调速器。

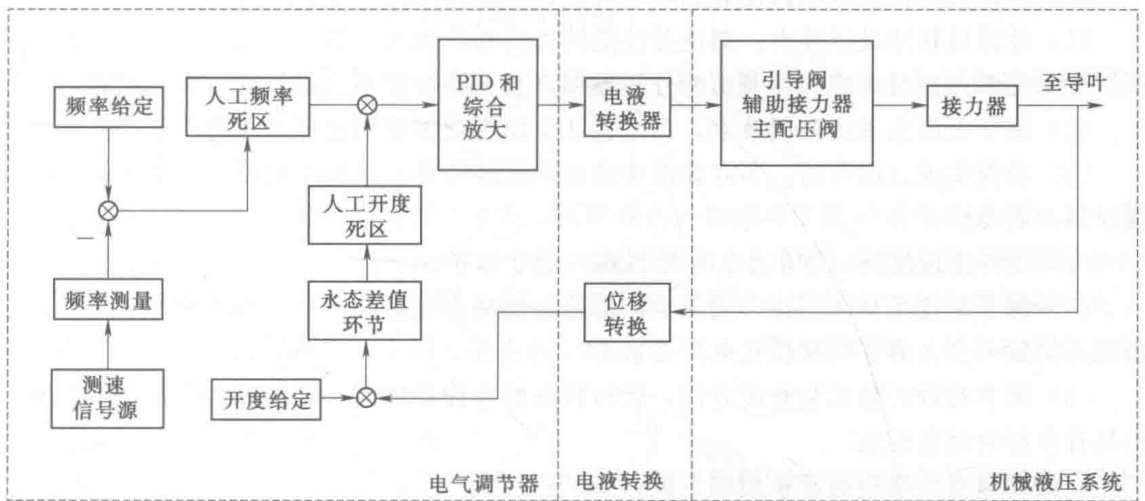


图 1-3 电气液压型调速器系统框图

3. 微型调速器

随着 20 世纪 70 年代初微型处理机的诞生，世界各国和地区相继在 20 世纪 80 年代开始研制微型调速器。我国于 1984 年研制成功第一台适应式变参数微型调速器并投入运行，到了 20 世纪 90 年代，我国大中型水电站已经普遍选用此种类型的调速器。微型调速器中，电气调节部分已经被微机取代，电液转换部分和机械液压部分并无本质的改动，微型调速器系统框图如图 1-4 所示。

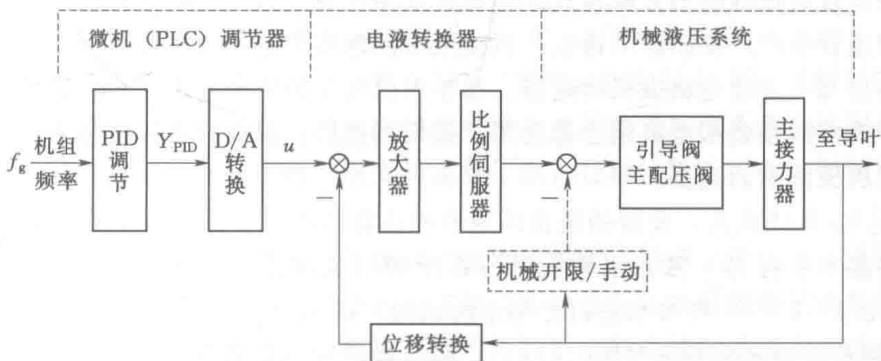


图 1-4 微型调速器系统框图

随着时代的发展，世界已进入数字化时代，数字产品优异的可靠性和处理能力已经为各个行业创造了无数佳绩，微型调速器不仅工作性能优越，可靠性得到大大提高，而且 PLC 相对于其他控制器的可扩展性较强，可根据实际需要扩展各种功能模块，尤其当系统需要与外界通信时，可以加装通信模块，此类通信模块实现简单，应用方便，且功能强大，此外一般的工业 PLC 都可以安全无误地工作数万小时，所以微型调速器取得了广泛的应用。但同时，一套基于微机的自动化系统还需要一套适用的算法与之搭配才能发挥最大的功能。

微机调速器与机械液压调速器和电气液压调速器相比具有以下优点：

(1) 计算机软件灵活性大，调速器性能的提高和功能的扩展有更大的灵活性和更高的可靠性，使多种控制规律和调节功能分别运用，甚至综合在调速器上运用成为可能。

(2) 便于采用先进的控制技术，可以保证水轮机调速系统具有良好的调节特性。

(3) 功能实现方便灵活，不需要增加或改动太多硬件，甚至不需要变动硬件就可以实现新增加的功能。

(4) 硬件集成度高，体积小，可靠性高，便于维护。

(5) 便于和监控系统连接，实现全厂的综合控制，可提高工厂运行的自动化水平，满足无人值班、少人值守的现代化电厂要求。

(6) 调节参数的整定和修改方便，运行状态的查询和转换灵活，使系统在各种工况下都具有良好的动态性能。

微机调速器的结构通常采用以下模式：

(1) 单微机模式，是一种最典型也是最基本的结构模式，实际上是电气液压调速器的翻版。

(2) 双微机模式，是在单微机模式的基础上，将易受干扰的数字电路冗余，即构成了双微机模式。

(3) 双通道模式，是在双微机系统的基础上，增加一套综合放大环节，就形成双通道系统。

(4) 混合型双微机并联模式，是在双微机系统之间采用相应的通信软件，整个系统在功能上与功能块级冗余与并联模式相当。

(5) 完全双通道混合型并联模式，是结构上相互独立的双通道模式。

目前调速器生产厂家已经不再生产机械液压调速器和电气液压调速器了，原有的电气液压调速器也基本上改造成微机调速器。现在不仅大型和中型水电机组的调速器均采用微机调速器，大多数小型水电机组也都选用了微机调速器，目前只有极少数未改造的小型机组还在使用机械液压调速器。

20世纪80年代以来，我国的微机调速器的计算性能和功能都与水轮机调节技术的国际先进水平基本上保持一致。水轮机调节系统的国家标准《水轮机控制系统技术条件》(GB/T 9652.1—2007)和《水轮机控制系统试验》(GB/T 9652.2—2007)也与国际标准《水轮机控制系统规范导则》(IEC 61362)和《水轮机调试系统试验规范》(IEC 60308)水平相当。

我国的微机调速器目前具有以下特色：

(1) 水轮机调节系统的适应式变参数PID调节规律。

(2) 带功率开环增量环节的功率调节模式。

(3) 微机调节器的模块级双微机交叉冗余技术。

(4) 交流伺服电机或步进电机驱动的电液转换器。

(5) 具有故障状态下自复中的主配压阀和机械液压手动装置。

(6) 中小型调速器采用的数字阀电液转换装置。

(7) 频率测量、导叶接力器位移测量等的检错、容错技术。



1.3.2 按调速器电液随动系统的类型划分

作为调速器主要组成部分的电液随动装置也在不断发展,目前,水轮机调速器电液随动系统主要有以下几种基本类型。

1. 步进电机或伺服电机加主配压阀结构

这一结构是微机调速器经过近十年发展所形成的一种经典的随动系统。目前,大多数的大型调速器都采用或含有这一结构。它将控制器所输出的脉冲信号转换成机械位移信号,控制液压放大级引导阀活塞位移,经过主配压阀液压放大后控制主接力器位移。由于其摒弃了传统的电液转换器,采用步进电机,解决了发卡、漏油等问题,控制品质又接近电液转换器,所以得到了广泛的应用。

2. 比例伺服阀加主配压阀结构

这一结构主要用于大型调速器,通过高性能的比例伺服阀将控制器信号转换成压力油的流量信号,此流量信号作为先导级,输入主配压阀经过液压放大后控制主接力器的位移。这一结构采用标准的液压元件,结构紧凑,导叶运动曲线优美,是一种不错的解决方案。目前采用这一结构的电液伺服系统,国内一般都用数字球阀作为冗余热备用系统,以提高系统的可靠性。

3. 数字阀加主配压阀结构

这一结构主要用于中小型调速器,通过数字阀将控制器的脉冲信号转换成压力油的流量信号,此流量信号作为先导级,输入主配压阀经过液压放大后控制主接力器的位移。这种结构造价低、结构紧凑,缺点是控制曲线连续性略差,但是对于中小型机组,完全可以满足调节要求。

4. 标准液压元件组成的高油压系统

以上结构都采用低压系统,油压一般不超过 7MPa,在保证同等操作功的情况下,主接力器一般需要通过大流量的压力油,这样要求整个液压放大系统流量和体积都较大,不易采用标准的液压元件,主配压阀一般由调速器厂家自行设计制造,性能和精度有时较难保证。

在中小型调速器领域,业界提出了提高系统液压等级,取消主配压阀,采用液压标准元件的方案,并成功应用。这种由液压标准元件组成的高油压电液随动系统具有制造工艺简单、电厂运行成本低且性能稳定、可靠等优点。目前这种电液随动系统多以电液比例阀作为核心元件实现接力器位移的控制,但电液比例阀控制复杂、抗油污能力差,且由其构成的液压系统成本也不低。

1.3.3 按接力器容量或主配压阀直径大小划分

接力器容量指当操作油压为最小规定压力 P_R 时,使主接力器以最短的时间关闭或最短的时间开启时的净作用力 F 与接力器最大行程 Y_{\max} 的乘积,即操作功(调速功),也称驱动能量,即

$$E_R = FY_{\max}$$

式中 E_R ——接力器容量, $N \cdot m$;

F ——活塞有效面积与最小规定压力的乘积，N。

最小工作压力的估算公式为

$$P_R = (0.8 \sim 0.9) P_D$$

式中 P_D ——设计压力。

按接力器容量或主配压阀（接力器控制阀）直径大小来划分，电液调节装置分为大型、中型、小型、特小型，具体划分见表 1-1。

表 1-1 按接力器容量或主配压阀直径大小划分

类别	划分依据
大型	$E_R > 75000 \text{ N} \cdot \text{m}$ 或 $D \geq 80 \text{ mm}$
中型	$18000 \text{ N} \cdot \text{m} < E_R \leq 75000 \text{ N} \cdot \text{m}$
小型	$3000 \text{ N} \cdot \text{m} < E_R \leq 18000 \text{ N} \cdot \text{m}$
特小型	$350 \text{ N} \cdot \text{m} \leq E_R \leq 3000 \text{ N} \cdot \text{m}$

注：1. E_R 为接力器容量， D 为主配压阀直径。

2. 当调节装置主配压阀直径大于 80mm 时，其接力器容量也一定是大于 75000N·m 的。

1.3.4 按照执行机构的数量来划分

按照执行机构的数量来划分可分为单调整电液调节装置和双调整电液调节装置。双调整电液调节装置只对主接力器进行控制，双调整电液调节装置能实现对转桨式/冲击式水轮机、带调压阀（空放阀）控制的水轮机导叶/喷针、转轮叶片/折向器（偏流器）及调压阀双重调整。

1.4 现代电力系统对水轮机调节系统的要求

现代微机调速器的发展，必须适应现代电力系统运行对调速器的主要运行特性的要求。在现代电力系统中，水轮机调节系统应能满足以下要求：

(1) 被控机组空载工况时，微机调速器应在可能的运行水头范围内控制机组频率，使其跟踪于电网频率，以便于机组尽快平稳并入电网。微机调速器此时主要工作于频率调节模式下。

(2) 被控机组并入大电网工况。

1) 对于被控机组承担固定负荷的微机调速器，应该完成电网的一次调频。

2) 完成二次调频指令。接收水电 AGC（或调度指令）系统的功率给定值，在机组可能的运行水头范围内，快速且近似单调的控制机组实发功率到达功率给定值，完成电网二次调频的机组功率控制任务。微机调速器应工作于功率调节模式，主要起机组功率控制器的作用。

3) 当电网的频率偏差过大时，微机调速器应能自动转为频率调节模式工作。

(3) 作为电网调频机组时，调速器工作于频率调节模式，但仍然接受 AGC 系统的功率给定值。小频差时，微机调速器按静特性起调频作用；电网的大频差则由电网 AGC 系统的调频功能通过下达给机组的功率给定值完成电网调频任务。