

## 摘要\*

本文在系统总结抽水蓄能电站及其控制技术、维护技术、建模与仿真技术、智能控制及其在水电机组中应用的发展和现状基础上,结合中国-欧盟研究项目 EIAM-IPE,首次提出一种基于 ICMMS (Intelligent Control-Maintenance-technical Management System, 智能控制-维护-技术管理集成系统) 框架体系的抽水蓄能机组调节系统。结合九五国家重大科技攻关项目子题——三峡全数字式水轮机调速器研究、科技部技术创新基金等项目,提出了一种基于可编程计算机控制器的用于巨型机组的步进式双调节 PLC 水轮机调速器。本文主要研究内容如下:

提出了基于 ICMMS 思想的新型抽水蓄能机组调节系统硬件体系结构和包含多个域过程 DP 的软件体系结构,实现系统的控制、维护和技术管理。提出并实现对开度和频率测量模块进行故障诊断和性能降低诊断。首次提出将预知维护智能分布到抽水蓄能(或常规)机组调节系统中。

提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统的预知维护系统体系结构;它按 ICMMS 框架设计,不仅包括状态监测、故障诊断、故障记录与追忆,而且包括设备状态预测、故障预测、故障影响分析、维护决策支持。

在分析传统建模与仿真方法特点基础上,提出分布式、面向环节的、可视化抽水蓄能机组调节系统建模与仿真。开发了基于 MATLAB with SIMULINK 的开放式可视化模型库和图形用户接口。借助于鼠标便可完成系统组态,其仿真结果以动态曲线和性能指标两种形式呈现,便于定量分析、比较。在该仿真平台上研究了水轮机调节系统在孤网运行中的稳定性。

提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统的智能模糊控制策略,它基于解析控制规则,具有智能积分,有效消除了调节偏差。与 PID 控制的对比仿真试验表明:优于 PID 控制,鲁棒性好。提出并实现调速器控制参数自整定,提出调速器智能积分控制策略,在变参数控制中,不宜切除积分项而应改变积分强度。提出了一种防步进电机失步的智能诊断与控制策略,既可高速启动满足快速性,又不会造成失步满足可靠运行要求,现场运行证明正确、有效。实现了不依赖空载开度和电站运行水头的智能闭环开机策略。

---

\* 本文得到中国-欧盟合作研究项目 EIAM-IPE (INCO DC Project 961744)、九五国家重大科技攻关项目子题——三峡全数字式水轮机调速器研究、科技部技术创新基金(19994204040699)、东方电机股份有限公司和宜昌市能达通用电气股份合作公司部分资助。

# 华中科技大学博士学位论文

---

提出一种用于巨型机组的基于可编程计算机控制器的步进式双调节 PLC 水轮机调速器，它直接用正反转脉冲控制步进电机，有效减少时延，消除了步进电机控制中性能瓶颈；用 PLC 内部高速计数器测频解决了大型 PLC 调速器测频模块可靠性问题；首次在 PLC 调速器中实现实时仿真和性能测试功能。具有 PLC 的高可靠性、C 编程的灵活性和 IPC 的实时性。该调速器也可用于三峡等单调节巨型机组。

本文研制出的我国第一套抽水蓄能机组调节系统已应用于工程实际。研制的用于巨型机组的基于可编程计算机控制器的步进式双调节 PLC 水轮机调速器已投入工业运行，即将进行部级鉴定。

**关键词：**抽水蓄能机组调节系统；ICMMS（智能控制—维护—技术管理集成系统），调速器，故障诊断，性能降低诊断，预知维护，分布式建模，面向对象仿真，模糊控制，可编程计算机控制器

## Abstract\*

An innovative Intelligent Control-Maintenance-Management System (ICMMS) based governing system for pumped storage units is proposed, on the basis of the survey of the control for pumped storage plants, maintenance, modeling, simulation and intelligent control of hydropower unit governing system. A Programmable Computer Controller based stepping motor driven governor for such giant plants as the Three Gorges Plant is put forward and developed. The major research achievements of the dissertation are as follows:

A new type of ICMMS based hardware architecture and software architecture including multi-domain processes is proposed for the first time to implement the control, maintenance and technical management of the governing system to the pumped storage unit. The fault and performance degradation diagnosis on the gate opening and frequency measurement modules has been proposed and implemented. The distribution of predictive maintenance intelligence into the governing systems for pumped storage and conventional hydro units is proposed.

An architecture of predictive maintenance systems for governing systems of pumped storage units is put forward on the basis of the ICMMS. It includes not only state monitoring, fault diagnosis, fault recording and calling back, but also prediction of the state of the governor, fault prediction and effect analysis, and maintenance support.

After the analysis of conventional modeling and simulation methods, a distributed object-oriented simulation platform of pumped storage unit governing systems is proposed and developed. The platform, based on MATLAB with SIMULINK, consists of open, visual models library and graphic user interface. It features convenient configuration of a governing system with a mouse, and two forms of simulation results including performance indices and dynamic curves for quantitative comparison between different cases. It has been used for study of the stability of the hydraulic turbine governor synchronized with an isolated network.

An intelligent fuzzy control strategy for pumped storage unit governing systems is proposed. The analytical rule based fuzzy control with the intelligent integral to eliminate the regulation

---

\* The dissertation is partly funded by: the European Commission as INCO DC Project (No. 961744); the State Significant Key Project in Science and Technology in the 9th Five-Year Plan of China, as the Fully Digitalized Hydraulic Turbine Governors for Three Gorges Plant; the Innovation Fund as Intelligent Hydraulic Water Turbine Governors, Ministry of Science and Technology, China (No. 19994204040699); Dongfang Electric Machinery Co. Ltd, China; Yichang Land General Electric Cooperation Co., China.

error is advantageous to the conventional PID law in dynamic performance and robustness. A technique of on-line self-tuning control parameters is studied. A new control and diagnosis strategy on the misstep of the stepping motors are developed to guarantee both fast response and reliable operation. Its effectiveness is demonstrated on site. The closed-loop start-up strategy independent of the no-load opening and the current head of the unit is implemented, too.

A Programmable Computer Controller based stepping motor driven governor for such giant hydraulic generating units as that in the Three Gorges Plant has been put forward and developed. The governor generates directly pulses to control the rotation of the stepping motors to decrease greatly response time, measures frequencies of the unit and network with its internal high speed counting pulses to guarantee both the accuracy and the reliability. The performance testing function and the real time simulation are integrated into a PLC based governor at the first time. Its software is developed by high level language, instead of Ladder Diagram. It features high reliability of a PLC, programming flexibility of C language, and short real time of IPC.

The first governing system for pumped storage units in China, developed by the author, has become an industrial product. The Programmable Computer Controller based stepping motor driven governor for giant hydraulic generating units has been put into operation on site.

**Keywords:** governing system for pumped storage units, Intelligent Control-Maintenance-Management System (ICMMS), hydraulic turbine governor, fault diagnosis, performance degradation diagnosis, predictive maintenance, distributed modeling, object oriented simulation, fuzzy control, programmable computer controller.

## 1 概 论

**摘要:** 本章首先综述了抽水蓄能电站在国内外的發展历史和现状, 指出抽水蓄能电站以其独特的优势将在我国得到大力發展。论述了抽水蓄能电站控制的特殊性及其技术演变。详细叙述了抽水蓄能机组调节系統的發展历史和现状。回顾了控制系統维护技术的發展和智能控制的现状, 讨论了控制系統建模与仿真技术。最后提出了一种基于 ICMMS 的抽水蓄能机组调节系統, 并简要介绍了本文的内容。

### 1.1 抽水蓄能电站及其控制技术發展

#### 1.1.1 抽水蓄能电站發展概况

由于人们对环境污染和生产成本的关注、以及自然环境的约束, 电站正朝着大容量、远距离输电和核能化的方向發展<sup>[1-9]</sup>, 考虑到经济性, 火电站和核电站等大型机组尽可能承担基本负荷、径流式水电站运行于基荷区。而水电站和抽水蓄能电站则经常用于满足电力系统负荷变动要求, 它们除完成诸如防洪、灌溉等其它任务外, 主要目标之一是随时保持发电与配电之间的平衡, 从而保证电力系统有最高的可靠性和最低的运行费用。高温高压的火电机组和核电机组的比例越大, 电力系统的调节能力越差; 同时由于机组容量越来越大, 电力系统的事務备用问题渐显突出。在这种情况下, 抽水蓄能电站得到迅速发展<sup>[10-11]</sup>, 它一方面承担峰荷, 另一方面当电网功率过剩时从电网吸收功率将水抽到上库储存起来(抽水蓄能), 在峰荷时再发电。由于它灵活地调节电力系统峰谷差, 并能迅速向系統提供事故备用容量, 大大改善了电力系统的运行条件。

##### 1.1.1.1 国外抽水蓄能电站建設与發展<sup>[8-13]</sup>

自从世界上第一座抽水蓄能电站 1882 年问世, 迄今已愈百年。最初兴建抽水蓄能电站的目的是将火电站非峰荷时的低价电能转换为峰荷时的高价电能。随着电力需求不断增长,

同时电力系统削峰填谷需要越来越大,而工业发达国家的常规水电能源已基本开发殆尽,削峰填谷和动态效益好的抽水蓄能电站得到了迅速发展。发达国家从60年代开始进入兴建抽水蓄能电站的高潮,迄今已有近40年的历史。许多发达国家抽水蓄能电站装机容量已占电力系统总水电容量的20%-50%。能源缺乏的日本,已有40多座抽水蓄能电站,总装机容量在20000MW以上,基本和常规水电装机容量相等,占电力系统容量10%以上。英国、法国已建抽水蓄能电站的装机容量已逾5000MW,而在1973年仅为173MW。美国是抽水蓄能方面投资最大的国家,现有20多座装机容量超过200MW的抽水蓄能电站,并确定了17000MW的开发计划。从发展看,抽水蓄能电站的比重还将会增加,这是由于随着经济的不断发展,社会对电力的需求日益增长,电网中各种能源包括煤电、油电、核电、天然气发电等增加很快,而常规水电因受水能资源的限制不能成比例增加,这就造成了系统缺乏调峰电源,影响送电质量。兴建抽水蓄能电站是解决电网调峰问题的经济而行之有效的途径。

据不完全统计,世界抽水蓄能电站约有400座,总容量约1.5亿kW。从总的趋势看将向高水头大容量发展,这是因为在同样条件下水头越高越经济合理。抽水蓄能电站以日调节居多,近年发达国家已逐渐进入周调节或季调节。国外抽水蓄能电站的任务是以调峰、填谷和承担旋转备用为主。如英国迪诺威克抽水蓄能电站承担旋转备用容量占44%,发电占56%;奥地利库塔抽水蓄能电站主要任务是调峰、填谷,调峰电量输送给德国南部电网。法国抽水蓄能电站除用于调峰、填谷、备用外,有10%的容量用于调频和与外国交换电能,调相的时间占总运行时间的12%~20%。日本抽水蓄能电站主要为电网调峰、填谷,同时留有相当多的库容承担紧急事故备用。国外抽水蓄能电站是按电网总体安全、经济运行核算经济效益,一般不以电站的实际发电量多少而定。电站的收入主要取决于其运行给电网带来的效益大小,而不是仅取决于高峰电价和低谷电价的差额。

## 1.1.1.2 我国抽水蓄能电站建设与发展<sup>[10-15]</sup>

我国抽水蓄能电站建设开始得较晚。1968年在河北省岗南水库安装了1台从日本引进的11MW抽水蓄能机组。1972年在北京的密云水库安装了2×12MW的国产抽水蓄能机组。80年代后我国的抽水蓄能电站建设进入“快车道”。潘家口混合式抽水蓄能电站在已建1台150MW常规机组之外,安装3×90MW抽水蓄能可变速运行的机组,由意大利和瑞士厂商供货,在1992年前后陆续投产,为华北电网服务。广州抽水蓄能电站一期工程(4×300MW),是我国第一座高水头、大容量、参数先进的大型抽水蓄能电站,设计水头为535m,其运行方式主要是配合大亚湾核电站运行。1994年全部建成投产,为广东电网和香港九龙电网服务。运行实践证明:由于广州抽水蓄能电站建成投产,大亚湾核电站得以实现不调荷安全稳定运行,同时提高了电网的供电质量。广州抽水蓄能电站二期工程(4×300MW)于1994年开工,现已全部建成,是世界上容量规模最大(8×300MW)的抽水蓄能电站。为了解决华北电网调峰困难的问题,建设了十三陵抽水蓄能电站可逆式混流机组,装机4×200MW,水头430m。该电站1989年开始施工准备,1997年6月4台机组全部建成发电。

投产以来为华北电网的调峰填谷、调频、调相、事故备用起到了显著的作用，极大地缓解了调峰紧张局面，为增加供电可靠性，保证电网安全稳定运行发挥了积极的作用。天荒坪抽水蓄能电站装机  $6 \times 300\text{MW}$ ，水头  $570\text{m}$ 。首台机组已于 1998 年 9 月投产，该电站主要是配合秦川核电站运行，承担华东电网的调峰任务。

我国台湾省为解决电网调峰，在 1985 年建成  $1000\text{MW}$  的明湖抽水蓄能电站后，1993 年又建成了  $1600\text{MW}$  的名潭抽水蓄能电站。

有一批抽水蓄能电站正在规划和设计之中，如：河北张河湾抽水蓄能电站装机  $4 \times 250\text{MW}$ ，水头  $344\text{m}$ ；山东泰安抽水蓄能电站  $4 \times 250\text{MW}$ ，水头  $245\text{m}$ ；浙江桐柏抽水蓄能电站  $4 \times 300\text{MW}$ ，水头  $245\text{m}$ 。

未来几十年我国还将大力发展抽水蓄能电站。其原因是：

(1) 常规水电增加有限、分布不平衡，造成了系统缺乏调峰电源，影响送电质量。

近年来我国水电建设发展很快，在建和待建的水电站星罗棋布，如三峡、二滩、万家寨、天生桥、小浪底等大型工程正在修建；待建的如小湾、龙滩等大型工程，一般装机都在  $1000\text{MW}$  以上，其中三峡水电站最大，为世界之首，达  $18200\text{MW}$ 。1999 年我国水电装机总容量已达到  $64000\text{MW}$ ，居世界第三位。但这些水电站基本分布在西南及中部，华北、东北等地区常规水能资源缺乏，限制了这些地区的水电发展，致使调峰矛盾日益突出。社会对电力的需求日益增长，电网中其它能源增加很快，而兴建抽水蓄能电站是解决电网调峰问题的经济而行之有效的途径。

(2) 目前电力基本可以满足需要，但电网仍然存在较大峰谷差。

1997 年至 1998 年京津唐电网平均峰谷差为  $28\% \sim 30\%$ ，而且负荷变化迅速，需要有高度灵活可靠的调峰手段，电网面临的调峰压力依然很大。目前火电机组还需采用两班制， $100\text{MW}$  机组停机备用或压负荷  $50\%$ ， $200\text{MW}$ 、 $300\text{MW}$  机组分别压负荷  $60\%$  和  $85\%$  参与调峰运行。这些措施虽然保证了电网频率波动在合格范围内，但同时也使火电调峰机组偏离最优工况运行，使其安全性、经济性均有所降低。

(3) 抽水蓄能电站经济效益日益受到肯定。

评价抽水蓄能电站的经济效益应从电力系统整体出发，不能以“ $4\text{kWh}$  低谷电换  $3\text{kWh}$  高峰电”来核算<sup>[14]</sup>。以十三陵抽水蓄能电站为例，自其投入京津唐电网后，不仅可顶替峰荷  $800\text{MW}$ ，还可承担  $1600\text{MW}$  的峰谷差，具有调峰填谷的容量效益；而利用系统低谷剩余电能抽水，这是其它电源所不具备的独特功能。此外还具有调频、调相、快速爬坡及事故备用、增加供电可靠性等多项动态效益。抽水蓄能机组与燃煤机组比，负荷跟踪性能好，开停机灵活。日本抽水蓄能电站主要为电网调峰、填谷，同时留有相当多的库容承担紧急事故备用。国外抽水蓄能电站是按电网总体安全、经济运行核算经济效益，而不是仅取决于高峰电价和低谷电价的差额。此外，抽水蓄能作为“质优价廉”的水力资源，其生产过程不产生“三废”，对环境基本没有污染。如建设火电站来解决同样的调峰问题，则带来的环境影响和环境污染要大得多，环境处理的费用也十分昂贵。因此，在日益重视环保的现代社会，抽水蓄能电站给电网带来的环境效益也是显而易见的。加快抽水蓄能电站的发

展,是优化电源结构、建设现代化电网的必然趋势。这一观点被越来越多的人所接受和认识。

(4) 我国抽水蓄能电站占电力系统比重远低于合理值。

研究表明,电力系统内抽水蓄能电站占总容量的合理比重为 8%~12%。而我国已建容量约为 2%。随着人们对电能质量的要求不断提高,今后必将大力发展抽水蓄能电站。

## 1.1.2 抽水蓄能电站控制技术发展

抽水蓄能电站绝大多数按可逆式设计,水轮机/发电机运行时是一个方向,电动机/水泵运行是另一个方向,这就决定了抽水蓄能电站的控制比常规电站复杂得多;另一方面,抽水蓄能电站在电力系统中承担调频、调峰、事故备用等任务,是电力系统安全、稳定、可靠的关键,故对其可靠性要求高。与常规水电机组相比,抽水蓄能机组具有运行工况多,工况变换复杂,控制方式复杂,操作频繁,监视量多,可靠性要求高等特点<sup>[3, 16-23]</sup>,这些决定了抽水蓄能电站控制比常规机组的控制要求更高。

### (1) 抽水蓄能电站监控系统的基本要求

抽水蓄能电站以机动灵活、反应迅速的特点调节电力系统负荷峰谷变化,提供紧急事故备用,调节电网频率,从而体现出抽水蓄能电站独特的动态效益。因此,对抽水蓄能电站控制系统的要求是:反应迅速、准确,工作可靠。但抽水蓄能机组及其配套设备比较复杂,机组工况转换频繁,且承受正、反两个方向旋转所产生的应力,故其可靠性、可利用率比常规机组低。此外,完善的监控功能是保证设备可靠工作的重要手段。

监控系统同样应满足经济性、易维护、易扩展、易升级等一般要求。

### (2) 抽水蓄能机组控制手段演进

抽水蓄能机组控制系统是一类特殊的工业控制系统,因此,它的发展与工业控制系统的发展同步,经历了从电磁继电器到固态电子逻辑组件到可编程逻辑控制器再到计算机控制系统的发展过程<sup>[3-8, 16-22]</sup>。20 世纪 70 年代以前,抽水蓄能机组的控制基本上都是电磁继电器,其缺点是占地面积大,闭锁不完善,可靠性低,监视功能差,无自检功能。装机 4×400MW 的美国 Raccoon Mountain 抽水蓄能电站是世界上最后一批采用电磁继电器控制的抽水蓄能机组。

随着电子技术的发展,晶体管固态逻辑控制系统很快应用到抽水蓄能电站中。1966 年瑞士 BBC 公司首次将电子组件构成的控制装置应用到抽水蓄能机组。这种无触点逻辑控制技术比传统的继电器逻辑装置前进了一大步。我国于 1968 年从日本 Fuji 公司进口一台 11MW 蓄能机组成套设备装在河北省岗南电站,这是我国第一台抽水蓄能机组,其控制设备就是采用的无触点逻辑控制技术。



70 年代末, 随着计算机技术的迅速发展, 采用可编程控制器逐渐代替固态逻辑控制装置, 显著提高了可靠性。

### (3) 抽水蓄能电站计算机应用

早期在抽水蓄能电站中计算机主要用于运行监视。1963 年美国汤姆索克抽水蓄能电站安装了一台巡回检测装置, 对电站 120 个电量、非电量进行监视, 包括机组出力、机组和变压器的温度、水库水位等, 还具有定期打印、越限报警等功能。

60 年代开始运用计算机进行数据处理, 1966 年投运的前西德萨欣根抽水蓄能电站采用 Z32 型过程计算机系统对全厂的数据收集、处理。此后, 计算机数据处理系统得到充分重视而发展迅速, 系统功能也不断扩大和加强。

70 年代中期开始采用计算机对抽水蓄能电站进行全面监控。早期较成功的是前西德于 1976 年投运的威尔霍伯格抽水蓄能电站, 装有  $4 \times 250\text{MW}$  三机式机组, 采用两机一变的扩大单元接线。由 Siemens 公司提供一套分层式计算机监控系统, 其结构与电站主接线相对应, 每一扩大单元配一台 16 位的过程计算机, 内存 48KB, 承担机组的工况转换、安全运行监视。电站另设一台中央数据处理计算机, 收集电站运行数据、记录事件、打印报表、计算蓄能机组短时过载能力等<sup>[3-8, 16-22]</sup>。

80 年代后, 国外新建的大型抽水蓄能电站几乎毫无例外地采用计算机监控系统。

国外一些著名的制造厂商在蓄能机组及其控制设备方面积累了丰富的经验。而我国已建的抽水蓄能电站的蓄能机组和控制设备均由国外厂商制造。1995 年以前, 我国蓄能机组及其控制设备的设计、制造属于空白。可喜的是: 东方电机股份有限公司与华中理工大学于 1995 年在国内率先研制抽水蓄能机组及其控制设备 (即本文的部分研究工作), 填补了我国在该领域的空白。

## 1.1.3 抽水蓄能机组调节系统发展

水轮发电机组将机械能转变为电能, 然后馈送到电网供用户使用。电力系统负荷中很大一部分是旋转机械, 它们对电网频率的变化相当敏感, 如风机、水泵的功率与频率成 3 次方关系, 电能质量重要性可想而知。德国能源法规定, 如果电力系统管理不善导致供电中断或系统电压、频率波动超出了法定界限而给用户财产造成损失, 除承担刑事责任外, 还必须接受经济罚款<sup>[24]</sup>。因此稳定电网频率具有重要的经济价值和社会意义。而频率的变化主要由有功功率不平衡引起。电力系统中负荷的变化时刻和变化幅度是不可预料和不可控制的, 因此, 必须实时调整发电机的有功功率, 以维持电网中有功功率的供需平衡, 从而维持电网频率的变化在容许范围内。调速器正是这样一种控制装置, 是水电站中一类重要的控制系统。

调速器除调节机组转速 (频率) 外, 还具有开机、停机、并网、调整负荷、调相等一系列控制功能。事实上, 它早已超过转速调节的范畴, 新的 IEC 标准 IEC61362-1998 称其

为水轮机控制系统 (Hydraulic Turbine Control System)。调速器的可靠性和高品质运行, 不仅关系到电能质量, 而且关系到机组安全。因此, 国内外众多研究人员开展了广泛深入的研究, 调速器伴随着科学技术的发展而不断发展。由于抽水蓄能电站的复杂性, 抽水蓄能机组调节系统 (即用于抽水蓄能机组的调速器, 简称抽水蓄能调速器) 的发展总是落后于用于常规机组的 (水轮机) 调速器的发展。因此, 下面先讨论用于常规机组的 (水轮机) 调速器的发展历史和现状。

## 1.1.3.1 水轮机调速器的发展

早期的调速器是机械液压型的 (简称“机调”), 原理简单, 易于掌握和使用, 在相当长一段时间里得到广泛使用, 直到现在, 国内外有些小型电厂仍在使用。在 50 年代, 随着电子技术的发展, 模拟电气液压型调速器 (简称“电调”) 应运而生, 其控制规律可以为 PI (Proportional-Integral, 比例-积分) 或 PID (Proportional-Integral-Derivative, 比例-积分-微分)。电气液压型调速器经历了电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路的发展阶段。

到了 80 年代, 计算机技术开始广泛应用到各个工业领域。国内外学者纷纷开展微机调速器 (简称“微机调”或仍统称为“电调”) 的研究。华中工学院于 1981 年在国内率先开展微机调速器开发研究, 1984 年我国第一台微机调速器在湖南欧阳海电站投入运行。在国际方面, ASEA 公司于 1982 年推出第一台微机调速器, 此后, 法国 Neypric、日本 Hitachi、瑞士 Sulzer、美国 Woodward 等国际著名大公司相继研制出各种微机调速器。可以说, 我国调速器的开发和研究与国际基本同步, 在控制规律和功能开发方面独具特色<sup>[26-30]</sup>。

微机调速器具有电气液压型、机械液压型调速器无可比拟的优点。首先, 其动静态特性比机械、电气液压调速器好得多。其次, 由于具有可编程特点, 可以实现灵活的控制规律, 而且可以根据电站的具体情况修改, 这对机械、电气液压调速器来说是不可想象的。而且微机比电子电路的可靠性高, 故障率低。另外, 友好的操作方式和直观的数字显示也提升了其价值, 其性价比高。一经推出, 大受欢迎, 迅速普及, 现在在调速器市场占绝对主导地位。

## 1.1.3.2 水轮机调速器关键技术现状<sup>[26-81]</sup>

考虑到技术发展趋势和当前市场的实际情况, 下面主要探讨微机调速器的关键技术的发展历史、现状和趋势。

众所周知, 微机调速器由电气部分 (微机控制器) 和机械液压部分 (电液随动系统) 组成 (图 1-1)。对于双调节水轮机调速器, 还有浆叶协联控制, 由微机协联控制器和电液随动系统组成。下面主要讨论对系统性能影响较大的系统结构、硬件平台、控制规律等方面的发展。

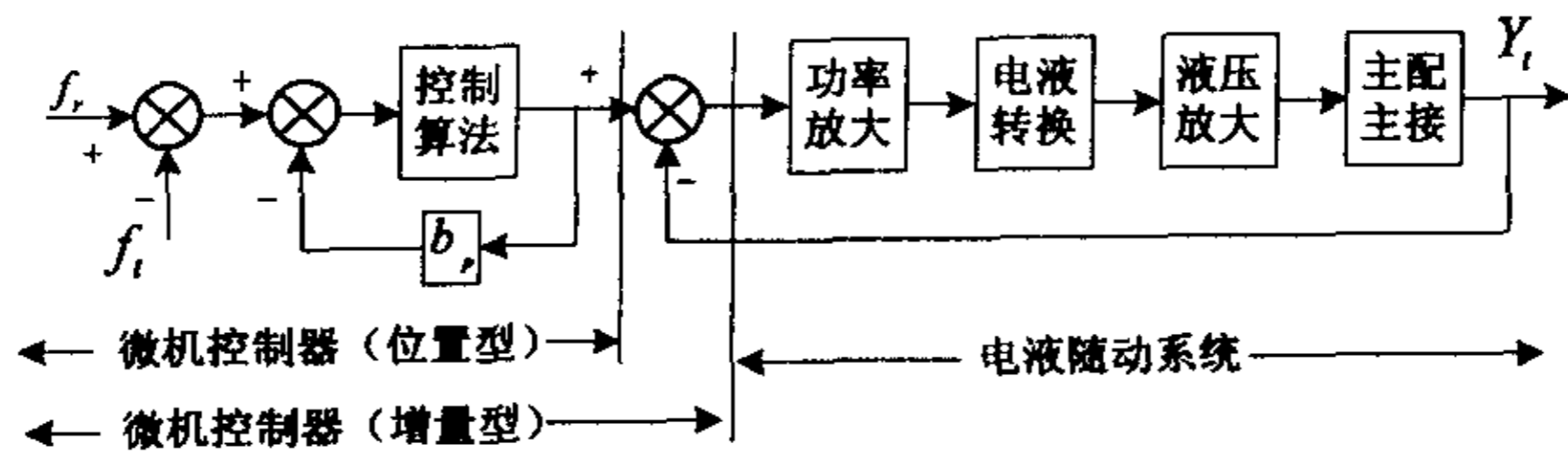


图 1-1 典型微机调速器构成

## (1) 系统结构模式

推动系统结构模式发展的主要动力是：提高调速器静态性能指标、动态性能指标和可靠性。从历史的眼光看，调速器经历了如下 6 类系统结构：

- ① 比例式
- ② 缓冲式
- ③ 加速度-缓冲式
- ④ 加速度-缓冲式 + 带中间接力器的机械-液压随动系统
- ⑤ 微机控制器 + (二级) 电液随动系统 [电气-中间接力器-液压二级随动系统]
- ⑥ 微机控制器 + (一级) 电液随动系统

前 3 种调速器的主配压阀在形成控制规律的闭环之内，后 3 种的主配压阀已移到闭环之外，其转速死区减小了一个数量级。带中间接力器的调速器电气和机械（随动系统）部分可以分别调试，维护方便。但当用于大型电站时，第二级随动系统的主接力器的机械反馈通常采用钢丝绳形式，实践证明这种反馈形式影响调速器静动态指标的提高。国外有些公司采用杠杆反馈，改善了调节品质。第 6 种减少了一个环节，有利于提高调速器的静动态指标，是大型调速器的发展方向。

## (2) 微机控制器硬件平台

调速器从硬件到软件，从功能到性能都经历了巨大变化和发展。

用于调速器的微机类型多种多样，从早期的 Z80, 8086, 8088，到后来的 STD 总线，VME 总线，现在用得最多的是 PLC (Programmable Logic Controller, 可编程逻辑控制器) 和 IPC (Industrial Personal Computer, 工业用个人计算机)。国外著名调速器厂家使用专用控制计算机。从可靠性角度来说，由于 PLC 专为恶劣的工业环境而设计，它的可靠性最高，有些 PLC 的 MTBF (Mean Time Between Failures, 平均无故障间隔时间) 高达 30 万小时。而 IPC 的数据处理能力最强，其可靠性随着计算机技术的发展也不断提高，符合工业控制系统的要求。考虑到我国的实际情况，专用控制计算机要么可靠性较低（调速器厂家自己开发），要么造价较高（调速器厂家委托计算机厂家开发，批量小），只有个别厂家具备较好的开发能力和较完善的质量保证体系，故专用控制计算机平台不适合我国当前的国民经济发展水平。综合来看，PLC 和 IPC 这 2 种硬件平台是符合国情的最佳选择。

## (3) 微机控制器结构

微机控制器最常用的是单机系统和双机系统，也有 3 机系统。

单机系统并不意味着是单 CPU，常常是多 CPU 体系。国外大公司如 ABB、Sulzer、Neypric 多采用此结构，我国基于 PLC 的调速器几乎全是单机系统。从运行实际来看，只要设计合理、把好工艺质量关、选用的微机可靠，单机系统也可以有令人满意的可靠性。

双机容错系统由 2 个模块组成，一个模块是主机，另一个是辅机，两者互为热备用。当主机故障时，切换逻辑将主控权自动地、无扰动地切换到辅机。这种配置的可靠性大大提高。另外，正常情况下，双机可互诊断，从而增加系统的功能、提高可靠性。这是我国调速器的常用结构模式。

3 机容错系统根据少数服从多数原则投票表决，从而确定正确的输出。Woodward 和华中理工大学都设计了这种结构的调速器。随着计算机技术的不断发展，双机容错系统已经具有足够高的可靠性，水电站采用 3 机冗余调速系统的极少。

## (4) 控制策略

早期的调速器是 PI 控制规律，某些电气液压型调速器实现了 PID 控制规律，但限于电子电路，整套调速器只有 2 套控制参数。

微机调速器由于通过软件实现控制和调节，容易实现复杂的控制规律。最早的微机调是电调的翻版，实现简单的 PID 控制规律。后来出现了适应式变参数 PID 控制、变结构-变参数控制，模型参考多变量最优控制，基于递推最小二乘辨识算法的自适应控制，鲁棒及分散鲁棒自适应控制，预测控制，变结构控制，非线性补偿控制，……取得了另人振奋的理论成果。近年来又开展了智能控制的研究。

## (5) 容错控制技术

所谓容错控制，就是当闭环控制系统中有一个或几个关键部件或环节出现故障时，系统采取某些措施，容许系统性能降级的情况下，维持在“自动”工况稳定地运行。这个思路特别符合我国电力系统的实际情况，不象国外电网容量大容许经常停机。借助双机容错系统，不难实现在下列情况之一时保持系统“自动”运行：(a) 机组频率失效时；(b) 接力器反馈失效时；(c) 功率反馈失效时；(d) 水头失效时；(e) CPU、存储器或总线失效时；等等。在单机模式或双机模式时也可采用软件容错的办法提高调节系统运行的可靠性。在这方面，我国的研发水平居世界领先地位。

## (6) 辅助功能集成

计算机技术发展迅速，调速器中的硬软件资源尚有较大裕量。因此，开发具有实用价值的辅助功能可提升调速器的价值。

调速器现场试验需要大量的仪器，测试项目多，测试人员的工作强度大。实践证明，将通常有外接仪器实现的测试功能内嵌到调速器中，深受欢迎。

此外，将开关量变位时间和各种故障发生、消失的时间记录下来，便于故障分析和故障处理。

## (7) 液压控制系统

与功能单一的机调不同，大中型电调常常分为“电柜”和“机柜”2部分。后者实际上是一个电液随动系统，它跟随于电柜的输出信号。调速系统的高性能和高可靠性是靠两者的密切配合实现的，机柜的重要性不言而喻。调速器机柜部分最大的变化是电液转换元件和系统结构。

前已述及，目前微机调速器主要以一、二级电液控制系统为主，而常用的电液转换元件有环喷式电液转换器、双锥阀式电液转换器、电液伺服比例阀，其特点是频响性能好，可构成一级液压随动系统；但防油污和防卡能力较差。后来出现了步进电动机式电液转换器、步进电动机-丝杠位移转换装置，因不用油彻底解决了电液转换器容易发卡的问题，显著提高了调速器的可靠性。随着技术进步，其频率响应已满足调速器动态性能的要求。原先主要用于构成2级液压随动系统，现在正在设计一级液压随动系统，是一种符合我国国情的电液转换元件，实践已证明广受用户欢迎。

### 1.1.3.3 抽水蓄能机组调节系统

抽水蓄能机组调节系统由于其复杂性和重要性，其技术发展落后于用于常规机组的（水轮机）调速器，国内外情况均如此。我国在1997年以前一直依赖进口，第一台抽水蓄能机组及其控制设备从日本进口安装在河北岗南电站，广州抽水蓄能电站的设备从法国进口。从长远看应建立和发展我国的抽水蓄能民族工业，开发具有自主知识产权的机组和控制设备。本文提出并开发成功的是我国第一套抽水蓄能机组调节系统，填补了我国在该领域的空白。

## 1.2 控制系统维护技术发展<sup>[82-122]</sup>

### 1.2.1 传统维护方式

维护问题直接关系到设备及系统的性能、可靠性、可利用率、寿命及效益，至关重要。传统维护方式主要是计划维护及事后维护。这也是我国企业采用的占主导地位的维护方式。

所谓事后维护，即在故障形成之后才进行维护，根据故障的严重程度，又可分为延缓性维护（Palliative Maintenance）和根治性维护（Curative Maintenance）。所谓计划维护

(Scheduled Maintenance)，即定期地对设备进行维护。在我国，通常又分为小修、中修、大修。

常用的计划维护是根据管理者的决策事先安排的，其依据是供货商的建议、系统警示、经验，等等，这种方式有其合理的一面，但维护费用很高。有时某些设备在计划维护的时间到来之前故障业已发生，造成经济损失，甚至人员伤亡；有些设备在计划的检修时间到来时却完全正常，造成了不必要的停机、停产和人力、财力的浪费，盲目的维护有时反而造成设备的损伤。因此，计划维护不仅增加了企业成本，而且导致某些设备故障几率增加、缩短其使用寿命。而事后维护完全是被动的，由于故障已经发生，非修不可，其后果和损失往往是严重的。例如，某抽水蓄能电站曾因转轮泄水锥脱落，导致转轮完全损坏，直接经济损失逾亿元。为了避免事故，提高设备使用率、减少维护费用，就应逐步减少乃至避免事后维护方式。

## 1.2.2 预知维护

随着设备监测与故障诊断技术的发展，状态维护 (Condition Based Maintenance) 方式变得可行，即根据设备的当前状态进行维护决策。如某个变量已超过规定的阈值，或观察到某些功能异常。而预知维护方式 (Predictive Maintenance) 则更进一步，它在综合考虑设备的历史状况、当前状况和设备固有特性等多方面因素的基础上，对设备未来的行为进行预测，及时发现设备将要出现的故障或性能降低，并据此作出维护决策，及时采取有效的维护措施，达到在故障出现或扩大之前将其消除的目的。即：在恰当的时刻、对恰当的部位采取恰当的维护决策，以便连续不断地管理维护活动，控制故障和失效，从而达到受控的维护 (Controlled Maintenance)。

预知维护带来的好处是明显的。一方面，由于它可以更有效地防止故障的发生或扩大，因而有助于减少乃至避免因设备故障造成的巨大的经济损失，甚至人员伤亡和环境污染等，带来巨大的经济效益与社会效益；另一方面，预知维护比事后维护简单、低廉，故可大大降低维护成本。因此，欧盟等发达国家投巨资开展这方面的研究。本课题组在国内率先开展研究。

## 1.2.3 ICMMS 体系下的预知维护

智能控制-维护-管理系统 (Intelligent Control-Maintenance-Management System, ICMMS) 是这样—个集成的信息体系结构，旨在通过信息的集成和智能的分布以及一致的实时信息，产生高性能、高效益和高可靠性，实现系统整体最优。欧盟在该领域进行了持续的支持，在欧盟第 4 个框架计划 ESPRIT 之 DG III 中资助开展 ICMMS 体系下的远程维护 REMAFEX Project (REmote MAintenance for Facility EXploitation)，其目标是定义对整个维护活动进行建模的方法，将维护与控制、技术管理集成，减少纠错维护和计划维护，

主张预知维护、状态维护,改进维护技能、增加维护效率、减少维护成本。其样机已在西班牙的电站和葡萄牙的电站投入使用。

## 1.3 智能控制及其特点<sup>[123-149]</sup>

### 1.3.1 传统控制

控制理论这门科学的产生,可追溯到十八世纪中叶的英国第一次技术革命。瓦特发明了蒸气机,它的控制是用离心式飞摆调速器实现的。后来,人们对控制系统稳定性、动态特性、静态特性进行了广泛深入的研究。这包括著名的 Routh、Hurwitz、Evans、Nyquist 以及 Lyapunov 等人。在本世纪 40 年代,控制理论的创始人 Wiener 系统地总结了前人成果,发表著作《控制论——或在关于动物和机器中控制和通信的科学》,论述了控制理论的一般方法,为控制理论的建立奠定了基础。控制理论的发展可分为三个阶段。

40~60 年代经典控制理论时期。由于当时数学计算工具的局限,其分析方法主要在频域中进行,如基于传递函数的频域分析法、根轨迹法。正因为如此,它主要较好地解决了单输入单输出、线性定常系统。

经典控制以 PID 控制器为代表,从本世纪三十年代末期到现在,已从模拟 PID 控制器发展到数字式 PID 控制器,其参数物理意义明确、调整方便,已广泛应用于工业控制(包括水电机组控制)。为了改善性能,PID 算法也在不断发展,出现了非线性 PID 控制,自适应 PID 控制等。研究表明:PID 控制对于模型精确的二阶被控系统,是一种比较理想的控制方式。大量的工业过程,如化工、热工、轻工、冶炼等生产过程可近似地用二阶系统表示,故一般采用 PID 控制。对高阶系统,或系统模型及参数复杂多变时,PID 控制显得力不从心。后来出现了适应式变参数 PID,改进了调节品质,但对水电机组控制系统(包括抽水蓄能机组调节系统)这类严重非线性、快时变的非最小相位系统,特别是机组惯性较小、且上下游水位波动影响较大时(贯流式机组是其典型代表)或  $T_d/T_w < 0.4$  时,其效果不佳。

60~70 年代,为适应空间技术的发展要求,也由于计算机的出现,导致人们研究多输入输出、非线性时变系统。这样复杂的系统用频域分析显然不现实,因此分析的方法是基于状态空间法的时域方法。这一时期是现代控制理论时期,以 Kalman、Bellman 和庞特里亚金为代表。现代控制理论已形成最优控制、随机控制、自适应控制、鲁棒控制以及变结构控制等多个分支,在航天和一些工业领域得到了应用。

经典控制理论和现代控制理论统称为传统控制,其主要特征是基于模型的控制,适合于解决线性、时不变等相对简单的控制问题。

随着科学技术的不断发展,控制领域面对的控制对象越来越复杂,而人们对控制品质的要求也越来越高,因而导致控制器设计的复杂性。同时控制过程和环境往往处于高度不

确定的情况下。经典和现代控制理论面临严峻挑战。显然，以 PID 为代表的经典控制理论无法胜任如此复杂、艰巨的控制任务。而现代控制理论也遇到了困难。对自适应控制系统而言，它必须辨识出被控对象的模型或解决系统重构问题，对复杂高阶、非线性系统却没有合适的方法，而且计算量很大，控制参数变化难以适应快速变化的被控系统，因此妨碍了其在工程实际中的应用。而对变结构控制和鲁棒控制而言，滑动区间或鲁棒区域必须已知且有限，设计时必须系统的鲁棒性和控制的精确性之间折衷。上述所有方法的共同点是：要求系统的数学模型已知（或通过辨识确定），而很多复杂的系统很难满足这样的要求。

## 1.3.2 智能控制

当复杂系统难以用精确模型描述，或存在难以用数学方法描述的不确定性时，传统控制（如 PID，自适应，自校正，状态反馈等）复杂的算法和可实现性之间形成了矛盾，在目前技术水平下难以有效地解决这类问题。因而人们寻求其他途径解决复杂的控制问题。70 年代末期，控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”的方向发展。前者是控制理论向广度的发展，而后者是控制理论向深度的挖掘。智能控制是研究与模拟人脑智能活动及其控制与信息传递过程的规律，使人们不仅从繁重的体力劳动中解放出来，也不断地从复杂的脑力劳动中“解脱”出来。

传统控制本质上是模拟人的行为，因此人们想办法模拟人的智能。人工智能自 50 年代创立以来，经过不断地发展，以 MYCIN、DENDRAL 等专家系统为代表，已经走向实际应用。人工智能的出现和发展为控制理论的继续发展注入了活力。

1965 年，傅京孙提出了把人工智能中的直觉推理方法用于学习控制系统。1967 年，Leondes 和 Mendel 正式使用“智能控制”一词，并将记忆、目标分解等简单的人工智能技术用于学习控制系统，控制理论朝着“智能控制”的方向发展，智能控制进入萌芽阶段。

从 70 年代开始，傅京孙、Gloriso 等人从控制论的角度进一步总结了人工智能技术与自适应、自组织、自学习控制的关系，正式提出智能控制是人工智能技术与控制理论的交叉，Saridis 则创立了分级递阶智能控制系统的系统结构。

1965 年，Zadeh 创立了模糊集合论，为解决复杂系统的控制问题提供了强有力的数学工具，导致了智能控制另一分支——模糊控制的创立。70 年代中期以后，模糊逻辑控制已经成功应用于工业过程中；智能控制与人工智能中的产生式系统、专家系统相结合。Åström 将人工智能中的专家系统技术引入控制系统，组成了另一类型的智能控制系统——专家控制。借助于专家系统技术，将常规 PID 控制、最小方差控制、自适应控制等不同方法有机地结合在一起，根据不同情况分别采用不同控制策略；也可结合许多逻辑控制功能。

80 年代以来，由于微机技术的迅速发展和人工智能在众多领域的实现，包括符号主义的专家系统日趋成熟，连接主义的神经网络的复兴，智能控制得到越来越多的应用。

进入 90 年代，智能控制的研究势头异常迅猛，智能控制的应用已扩大到军事、工业、日用家电产品等领域。今天，智能性已经成为衡量产品和技术高低的标准。



## 1.4 建模与仿真技术<sup>[150-168]</sup>

### 1.4.1 系统建模

“系统”这个术语在各个方面用得相当广泛，很难下一个准确的、统一的定义。1987年 G·戈登将系统定义为：按照某种规律结合起来相互作用、相互依存的所有物体的集合或组合。对许多要研究的系统，在系统建立起来之前，就得预见它的性能如何。很显然，当系统还处于假设阶段时，要用系统本身来做试验是行不通的。一种可以采用的方法就是：事先构造一些实物模型，然后在这些模型上进行试验。采用这种方法不但可能很昂贵，而且可能还会花很长的时间。此外，即使用这样的系统去做实验，要使它和实际系统完全相同也是不可能或不现实的。所以，一个模型不仅是用来代替系统，而且应该是对系统的简化，反映系统的本质特征。

一个系统模型可定义为：为了进行系统研究，用来收集系统有关信息的实体。对一个系统进行研究的目的不同，决定了所要收集的与系统有关的信息也是不同的。所以，用来表示一个系统的模型并非唯一的。不同的分析者所关心的是系统的不同方面，或者同一分析者要了解的是系统的各种变化关系，因此，对同一系统可以建立不同的模型。

对建模的基本要求是：①清晰。一个大系统通常有数个子系统组成，各个子模型之间的耦合应尽可能少、结构应尽可能清晰。②切题。模型应只包括与研究目的有关的部分，也就是抓主要矛盾，研究目的不同，则模型不同。③精密。根据具体要求确定。④集合性。有时要尽量以大的实体考虑对一个系统实体的分割。

模型可以分为物理模型和数学模型。物理模型是根据系统之间的类似性而建立起来的模型；数学模型则是用符号和数学方程式来表示一个系统，其中，系统的属性用变量来表示，而系统的活动则用互相有关的变量之间的数学函数关系式来表示。另外，物理模型和数学模型可以各自分为静态模型和动态模型。静态模型仅能表示系统处于平衡状态时属性的取值。而系统的动态模型，则可以用来表示系统活动随时间变化的结果。

对数学模型而言，可以按照对模型中被指定为系统属性值的变量求解的方法分为分析法求解模型和数值法求解模型。分析法又称解析法，它是应用数学理论推导、演绎去求解模型的方法。给出一个系统的数学模型之后，有时用分析法就可以求解系统的有关信息。但是，当不能应用分析法的时候，就必须应用数值算法去求解方程，数值法是应用计算程序求解数学模型的方法。分析法和数值算法之间的重要区别就是：分析法可以直接得到通解，而数值算法则是要一步一步地求得它的解，而且每一步的解是对于一个设定条件而得到的，同时这样的计算必须重复进行，以扩展解的范围。与用分析方法求解问题相比较，数值算法求解问题的主要缺点是：它只给出特解，而不是通解。

系统仿真模型则是采用数值计算技术求解的动态数学模型。

## 1.4.2 系统仿真

当建立了系统的模型（数学模型、物理模型或数学-物理模型）后，就在模型上进行试验或仿真。例如，为了修建一个大水电站，先建一个规模缩小的小水电站来取得水电站建设经验及其运行规律；指挥员利用沙盘来指挥一个战役或一场战斗，等等。之所以要用系统仿真通常是基于以下几个理由：

(1) 系统处于设计阶段，无法在真实系统上全面试验；或在真实系统上试验会破坏系统运行。

(2) 系统特性复杂，难于在实验条件下进行推导或做成一定比例的模型，同时又要降低这些系统的研究与设计费用。

(3) 需要验证在控制系统中所采用的数学模型方程是可用的。

(4) 需要根据对控制或决策变动后果的估算，来预测系统对复杂控制或决策的响应。

1966年 T. H. Naylor 将仿真定义为：在数字计算机上进行试验的数字化技术，它包括数字与逻辑模型的某些模式，这些模型描述某一事件或经济系统（或它们的某些部分）在若干周期内的特征。虽然该定义有局限性，但仍有相当大的影响。系统仿真可追溯到 2000 年前人类在建筑、造船等行业中对系统比例模型的应用，但系统仿真学科的形成是在 20 世纪 40 年代出现电子计算机以后。系统仿真是以相似原理、信息技术和系统技术及应用领域有关专门技术为基础，以计算机和专用设备为工具，利用系统模型对实际或设想的系统进行动态试验研究的一门多学科综合的技术性学科。系统仿真学科主要研究建立仿真系统及其仿真系统应用的理论、方法和技术。

仿真的分类方法较多，按仿真的实现方法和手段可分为物理仿真、计算机仿真（数学仿真）、半实物仿真和人在回路中的仿真（Man-in-Loop Simulation），等等；按模型类型分为连续系统仿真、离散系统仿真、连续-离散混合系统仿真和定性系统仿真。

对系统仿真最重要的要求是：①仿真结果可靠、精确。②建模、仿真效率高。③仿真模型具有柔性。

但是最关键的是模型及其软件具有可重用性。因为重用经过验证的模型增加了结果的可靠性；重用也提高了建模效率，改进了模型的柔性。面向对象技术（Object-Oriented Technique）为模型、软件的重用提供了基础，正因为如此，自从 20 世纪 90 年代以来，面向对象仿真成为热点。面向对象仿真具有如下优点：

- 模块化；
- 可重用（放在类库中）；
- 可扩充；
- 可理解（直接表示真实对象，用人们熟悉的图形图像表示）；
- 易于与人工智能结合；
- 易于实现并行仿真。

仿真技术集成了当代科学技术中多种现代化顶尖手段，正极大地扩展人类视野、时限和能力，在科技领域产生日益重要作用。

## 1.4.3 控制系统计算机辅助设计与仿真

随着科学技术的发展，控制理论和系统的研究显得越来越重要。40年代控制理论发展初期，控制系统的设计可以由纸笔等工具容易地计算出来。随着控制理论的迅速发展，控制效果要求越来越高，控制算法越来越复杂，控制器的设计也日益复杂，这样仅仅利用纸笔以及计算器等简单的运算工具难以达到预期的效果，加之计算机领域取得了飞速的发展，于是出现了控制系统的计算机辅助设计（Computer-Aided Control System Design，简称CACSD），又称作计算机辅助控制系统工程（Computer-Aided Control System Engineering，简称CACSE）。

应用计算机进行控制系统的设计是在70年代左右，它是在数字仿真的基础上逐步发展的，目的是解决如何把控制理论转换成工程上可以实现的方法。早在50年代，为了设计复杂的火炮控制系统，人们就已经采用了模拟计算机仿真技术，即事先构造被控对象和设计好的控制器的数学模型，然后将它们放在模拟计算机上，通过对整个系统的仿真实验，验证控制器是否满足设计要求，并根据某个控制指标调整控制器参数。60年代后，数字计算机逐渐普及，出现了大量通用的数字仿真软件及语言。控制系统的设计者开始在数字仿真软件及语言的基础上，增加有关控制器设计的模块，从而产生了第一代CACSD软件。

控制系统的计算机辅助设计的技术目前已经达到了相当高的水平，并一直受到控制界的普遍重视。近30年来，随着计算机技术的飞速发展，出现了很多优秀的计算机应用软件，在控制系统的计算机辅助设计领域更是如此，各类CACSD软件频繁出现且种类繁多，有的使用FORTRAN语言编写软件包，有的是人机交互软件系统，还有专用的仿真语言，在国际控制界广泛使用的这类软件就有几十种之多。

国际上CACSD软件的发展大致分为软件包阶段、交互式语言阶段及当前的面向对象的程序环境阶段。在早期的工作中，CACSD软件主要集中在软件包的编写上。这些软件包大多是用FORTRAN语言编写。使用不方便，调用过程繁琐，执行程序过多，维数指定困难，不利于传递数据，而且绘图功能较差。70年代末期和80年代初期出现了很多实用的、具有良好人机交互功能的软件，其显著特点是使用方便、集成度高，由几条简单的规范命令就可以实现以前FORTRAN类语言成千上百条语句的功能，且结果稳定可靠。MATLAB就是其中一个成功的范例，它将可视化建模、仿真、控制系统设计有机地结合，而且发展了多种控制工具箱，目前已成为国际控制界最流行的语言了。其不足之处是：使用者仍需一定的建模技巧和经验。

## 1.5 本文主要研究工作

本文首先系统总结了抽水蓄能电站及其控制技术的发展、维护技术、建模与仿真技术、智能控制及其在水电机组中的应用的现状,结合中国-欧盟合作研究项目 EIAM-IPE (INCO Project 961744)、东方电机股份有限公司委托科研项目,首次提出在 ICMMS 框架体系下设计抽水蓄能调节系统,将预知维护智能分布到调节系统中;提出了一种新的包含多个域过程的软件体系结构;提出并实现控制器参数自整定和智能积分控制,提出在调节系统变参数控制中,不宜切除积分项而应改变积分强度的观点。开发出的我国第一台抽水蓄能调速器已转化为工业产品,迄今产值 480 万元。结合九五国家重大科技攻关项目子题——三峡全数字式水轮机调速器研究、科技部技术创新基金(19994204040699)和宜昌市能达通用电气股份合作公司委托科研项目,提出了一种基于可编程计算机控制器的用于巨型机组的步进式双调节 PLC 水轮机调速器,首次在 PLC 调速器中实现性能测试功能;提出用 PLC 内部高速计数器测频,解决了大型 PLC 调速器测频模块可靠性问题;直接用正反转脉冲控制步进电机,有效减少时延,消除了步进电机控制中的性能瓶颈。

本文内容安排如下:

第 1 章首先综述了抽水蓄能电站在国内外的历史发展和现状,预计抽水蓄能电站以其独特的优势将在我国得到大力发展。然后论述了抽水蓄能电站控制的特殊性及其技术演变,详细叙述了抽水蓄能机组调节系统的发展历史和现状,回顾了控制系统维护技术的发展和智能控制的现状,讨论了控制系统建模与仿真技术。最后提出了一种基于 ICMMS 的抽水蓄能机组调节系统。

第 2 章提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统的智能模糊控制策略,它基于解析控制规则,具有智能积分,有效消除了调节偏差。与 PID 控制的对比试验表明:优于 PID 控制,鲁棒性好。提出了一种步进电机失步的智能诊断与控制策略,现场运行证明正确、有效。实现了不依赖电站运行水头和空载开度的智能闭环开机策略。

第 3 章在分析传统建模与仿真方法特点基础上,提出分布式、面向环节的、可视化抽水蓄能机组调节系统建模与仿真。描述了基于 MATLAB with SIMULINK 的开放式可视化模型库和图形用户接口,在该仿真平台上研究了抽水蓄能机组在水轮机工况下处于孤网运行时的稳定性。

第 4 章提出了基于 ICMMS 思想的新型抽水蓄能机组调节系统硬件、软件体系结构,实现系统的控制、维护和技术管理。提出并实现对开度和频率测量模块进行故障诊断和性能降低诊断。此外,描述了在抽水蓄能机组调节系统中如何实现嵌入式仿真和水泵优化控制。提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统的预知维护系统,它按 ICMMS 框架设计,不仅包括状态监测、故障诊断、故障记录与追忆,而且包括设备状态预测、故障预测、故障影响分析、维护决策支持。介绍了系统体系结构和功能模型。

第 5 章提出一种采用高可靠可编程计算机控制器作为硬件平台的用于巨型机组的步进式双调节 PLC 水轮机调速器,它直接产生正反转脉冲控制步进电机,用 PLC 内部高速计

# 华中科技大学博士学位论文

---

数器测频，首次在 PLC 调速器中实现性能测试功能，实现控制参数在线自整定，用高级语言开发实时多任务调控软件。具有 PLC 的高可靠性、C 编程的灵活性和 IPC 的实时性。

第 6 章对全文进行了总结，指出了继续研究的方向。

## 2 抽水蓄能机组智能控制策略

**摘要:** 本章提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统的智能模糊控制策略。它基于解析控制规则, 具有智能积分, 有效消除了调节偏差。将模糊化和模糊决策部分封装起来, 对用户来说是透明的, 只有系统设计者才可进行相应修改。将工程技术人员熟悉的比例  $K_p$ 、积分  $K_i$ 、微分  $K_d$  系数与模糊控制的相应组合联系起来, 不追求精确的函数关系, 而是概念上的类同。与 PID 控制的对比仿真试验表明: 优于 PID 控制, 鲁棒性好。提出了一种步进电机失步的智能诊断与控制策略, 现场运行证明正确、有效。实现了不依赖电站运行水头和空载开度的智能闭环开机策略。这些智能控制策略也可用于常规机组的调节与控制。

### 2.1 问题的提出<sup>[26-81]</sup>

抽水蓄能机组调节系统在水轮机工况下的控制规律和常规机组调节系统的控制规律有许多相似之处, 因此, 本章重点研究的抽水蓄能机组在水轮机工况下的控制策略也可用于常规机组的控制, 为简明起见以下用“调速器”统称两者。

调速器通常采用 PID 控制规律, 学者们对调速器稳定域和 PID 参数的整定方法进行了大量研究。由于抽水蓄能机组调节系统具有时变、非线性特性, 仅用 2 组控制参数无法使调速器在所有工况获得令人满意的性能。于是, 出现了适应式变参数 PID 控制 (实质是自适应控制中的增益调度表 Gain Schedule 方法)、变结构-变参数控制, 也就是根据机组工况和工作点的不同, 使用不同的控制结构和参数。实践证明, 这些控制策略简单、明了, 而且显著改善了控制系统的性能, 受到工业界欢迎。

但是, 上述控制方法在参数的整定上不够方便, 于是学者们将现代控制理论应用到调速器。出现了模型参考多变量最优控制, 基于递推最小二乘辨识算法的自适应控制, 鲁棒及分散鲁棒自适应控制, 预测控制, 变结构控制, 非线性补偿控制, …… 取得了丰硕的理论成果。

现代控制理论的特点是基于模型的控制, 当被控对象模型和参数未知时, 需要实时辨识以便确定控制参数。但抽水蓄能机组调节系统具有快时变和强的非线性, 而且个性很强, 难以建立统一的数学模型。这势必大大地增加了算法的复杂性, 造成具体实现上的困难。

近年来,兴起了研究智能控制理论的热潮,其中以模糊控制和神经网络控制为代表。智能控制不依赖于被控对象的数学模型,根据领域专家的知识 and 经验,具有强的鲁棒性和适应性。许多学者尝试将智能控制应用到调速器,取得了初步成果。随着智能控制理论的发展,智能控制策略将使调速器具有更强的适应性和更好的运行性能,具有很好的应用前景。

## 2.2 智能控制方法及特点<sup>[123-149]</sup>

经过人们长期研究和实践形成的经典控制理论,对于解决线性定常系统的控制问题是很有效的。然而,经典控制理论(PID是其典范)对于非线性时变系统难以奏效。随着计算机尤其是微机的发展和运用,自动控制理论和技术获得了飞速发展。基于状态变量描述的现代控制理论对于解决线性或非线性、定常或时变的多输入、多输出系统问题,获得了广泛应用,如阿波罗登月舱的姿态控制等。但是,无论采用经典控制理论还是现代控制理论设计一个控制系统,都需要事先知道被控对象(或生产过程)精确的数学模型,然后根据数学模型以及给定的性能指标,选择、设计适当的控制规律。然而,在许多情况下被控对象(或生产过程)的精确数学模型很难建立,即使可以建立,但参数时变性强,且过程具有非线性、强耦合等特点,对这类对象或过程难以进行有效地自动控制。

但另一方面,对上述难以自动控制的一些生产过程,有经验的操作人员进行手动控制,却可以收到令人满意的效果。这样的事实促使人们又重新研究和考虑人的控制行为有什么特点,能否对于无法构造数学模型的对象让计算机模拟人的思维方式进行控制决策。于是诞生了智能控制。智能控制在许多新兴学科和技术的推动下蓬勃发展,是多学科交叉交叉的结果。有人认为,智能控制是自动控制理论与人工智能的结合,也有人认为应加入运筹学、系统论。

### 2.2.1 智能控制方法

智能控制在具体的研究、发展中,形成了以下几个控制方法。

#### (1) 基于专家系统的控制

在基于专家系统的控制中,知识库就是控制规则库(专家知识库)。一般以 If - Then 产生式规则来构成推理机制。

#### (2) 模糊控制

以 Zadeh 的模糊控制集合论为基础,通过对模糊信息、非精确信息和知识的处理,进行模糊决策,然后解模糊控制。目前已在工业领域得到广泛应用。该方法的不知之处是:设计方法缺乏系统性,控制规则库以人的先验知识为基础,主观性强。控制查询表难以修改,等等。

## (3) 神经网络控制

神经网络通过神经元以及相互连接的权值,初步实现了生物系统的部分功能,具有任意逼近、学习能力。神经网络是高度非线性、超大规模并行处理的自适应信息系统,因而能有效解决高度非线性、严重不确定性系统的控制问题。但它缺少明确的物理概念,不好“理解”,推理过程不明确。

现在已开展上述 3 种方法两两结合进行控制的研究。智能控制理论现在还很不成熟、不系统,但是可以预料,智能控制将在众多相关前缘科学发展的带动下不断发展,而智能控制理论的深入研究必将推动相关科学的发展。随着科学技术的不断发展,智能控制的内涵也会更加丰富。

## 2.2.2 智能控制特点

智能控制之所以吸引众多学者研究,是因为较之基于模型的传统控制有如下特点:

(1) 研究的重点不再局限于被控对象,而是转向控制本身。

对象的准确数学模型对于控制来讲不再是必须的,这对许多复杂问题确实是一种福音。

(2) 适应性强。

与传统控制理论相比,其显著特点是在控制机构中加入了对环境变化和任务变化具有快速应变能力的智能推理决策单元,它不依赖于对象模型,具有很好的适应性。

(3) 学习能力强。

智能控制系统能够对一个过程和环境的未知特征进行学习,以便进一步分类、估计、决策和控制,从而改善系统的性能。

(4) 具有组织能力。

智能控制系统对于复杂的任务和分散的传感信息具有自行组织、协调的功能,并可在任务变化要求的范围内自行采集。而当众多目标冲突时,各控制器在一定限制条件下可自行解决。

(5) 处理方式灵活。

不仅沿用数值处理,而且引入符号表达、规则推理等非数据处理方式。定性、定量的结合,增强了完成各种复杂控制要求的能力。

## 2.3 智能模糊控制

由于智能控制具有智能信息处理、智能反馈、智能决策的特点,因此,在处理复杂性、不确定性和获得高的控制性能方面明显优于传统控制。在信息科学、思维科学、生命科学、人工智能等众多新兴学科和新技术的推动下,智能控制在近些年获得了长足进步。模糊和神经元网络作为智能控制的二种基本工具和手段,得到了众多学者的广泛研究。模糊控制不需要建立被控对象的数学模型,只需领域专家的经验、知识或操作,特点是鲁棒性强,



较易建立语言控制规则。已成功应用于工业反应过程的温度控制、水泥窑生产过程控制以及空调、洗衣机等家用电器中。而神经网络控制利用工程手段模拟人脑神经的结构和功能而进行控制，是一种大规模并行的非线性动力学系统，具有信息分布存储、并行处理以及自学习能力等优点。国内外学者进行了大量研究，已成功地应用于机器人控制。

由此可见，智能控制在抽水蓄能机组控制中的应用不仅是生产实际的需要，而且在理论上也是可行的。虽然神经控制具有一系列优点，但是对于抽水蓄能机组控制这类快时变系统在目前的技术条件下还难以实时实现。考虑到智能控制的工业可实现性，本节重点研究模糊控制在调速器中的应用。

## 2.3.1 模糊控制特点

模糊自动控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制。从线性控制与非线性控制的角度分类，模糊控制是一种非线性控制。从控制器的智能性看，它属于智能控制的范畴。著名的控制论专家 Zadeh 提出了模糊控制的思想，其后的大量研究和成功的工业应用证明，模糊控制效果好、鲁棒性强。

## 2.3.2 智能模糊控制调速器

模糊控制器输入变量的个数称为模糊控制的维数，通常将误差作为一个输入。但要想使模糊控制调速器获得较好的性能，仅仅利用误差这一个信息是不够的，误差的变化量也应作为变量。从理论上讲，模糊控制的维数越高，利用信息越多，控制系统的性能越好。事实上，维数过高，模糊控制规则过于复杂，控制算法的实现相当困难。目前广泛采用的是二维模糊控制器。

首先对误差（即频差  $e = f_r - f_i$ ）及误差的微分量进行模糊化得到知识库可以理解和操作的变量格式  $E$ 、 $EC$ ；然后根据专家经验制定出模糊控制规则并进行模糊推理，用模糊输入值去适配控制规则，为每个控制规则确定其适配程度，通过加权计算合并那些规则的输出，从而确定控制量。此时所得到的是模糊值，因此须对其解模糊后（模糊判决）才能控制被控对象（图 2-1）。

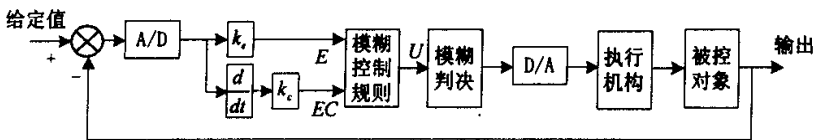


图 2-1 模糊控制原理图

## 2.3.2.1 精确量模糊化

调速器总是将系统的实际输出（机组频率）与希望输出（频率给定）进行比较，根据误差（频差）的大小对控制输出进行调整。为了获得良好的控制效果，往往还需根据误差的变化率综合考虑。但是，无论是误差还是误差的变化率，都是精确量，采用模糊推理前应首先将它们转换成模糊集合的隶属函数。将精确量(数字量)转换为模糊量的过程称为模糊化(fuzzification)，或称为模糊量化。模糊量化是模糊控制中至关重要的一环，它直接影响到控制系统的性能。定义输入量的隶属函数可采用高斯型、sigmoid、吊钟形、梯形和三角形，等等<sup>[123, 130]</sup>。

(1) 高斯型隶属函数的形状由两个参数决定： $\sigma$  和  $c$ ，其中  $c$  决定了函数的中心点， $\sigma$  决定了函数曲线的宽度（图 2-2）。其表达式为：

$$\mu = e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}}$$

参数  $x$  用于指定变量的论域（下同）。

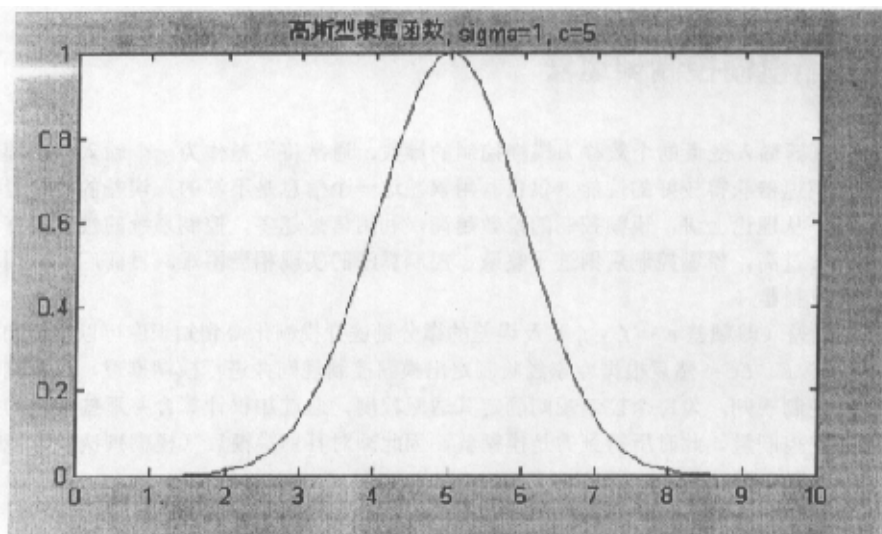


图 2-2 高斯型隶属函数 ( $\sigma=1, c=5$ )

(2) 吊钟形隶属函数的形状由  $a, b, c$  确定（图 2-3），其表达式为：

$$\mu = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$

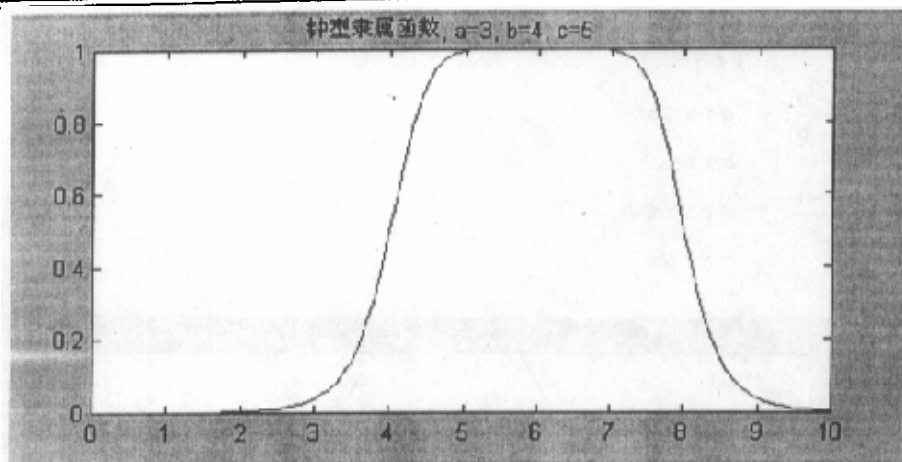


图 2-3 钟形隶属函数 ( $a=3, b=4, c=5$ )

(3) sigmoid 隶属函数的形状由  $a, c$  确定 (图 2-4), 其表达式为:

$$\mu = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

sigmoid 型函数具有半开的形状, 适用于作为“极大”、“极小”等语言值的隶属度函数。

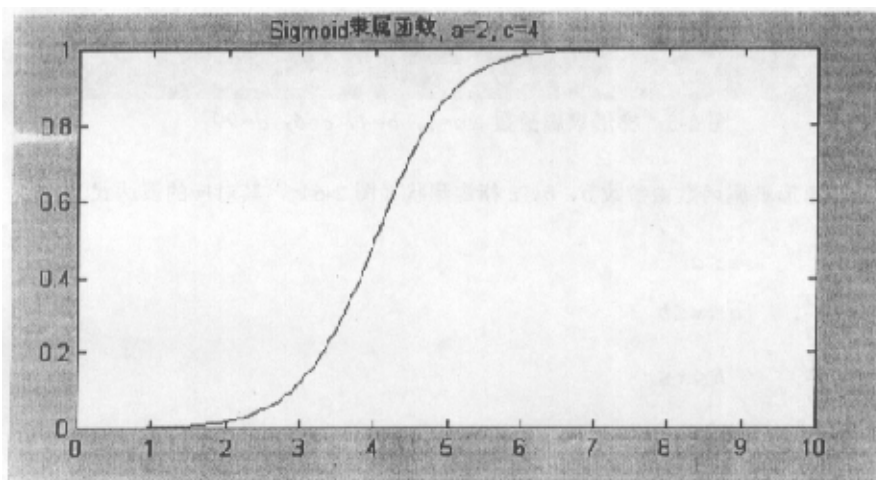


图 2-4 sigmoid 型隶属函数 ( $a=2, c=4$ )

(4) 梯形隶属函数由参数  $a, b, c, d$  指定形状 (图 2-5), 其对应的表达式为:

$$\mu = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$$

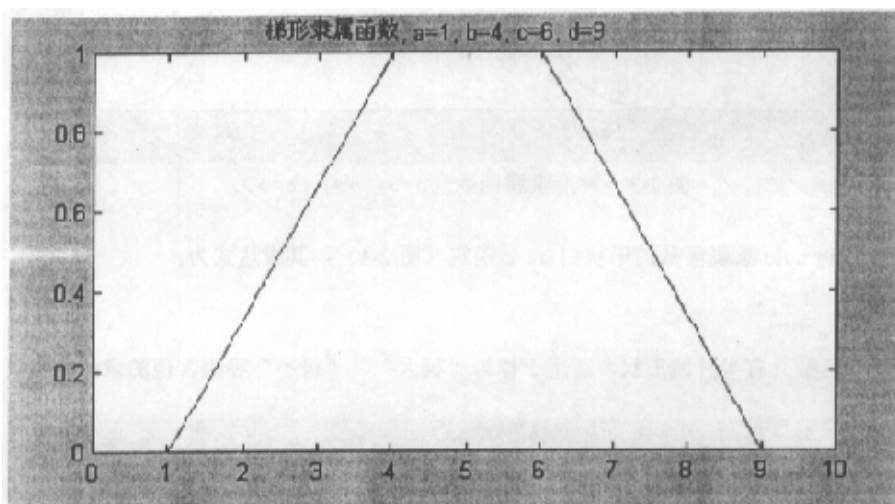


图 2-5 梯形隶属函数 ( $a=1, b=4, c=6, d=9$ )

(5) 三角形隶属函数由参数  $a, b, c$  指定形状 (图 2-6), 其对应的表达式为:

$$\mu = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases}$$

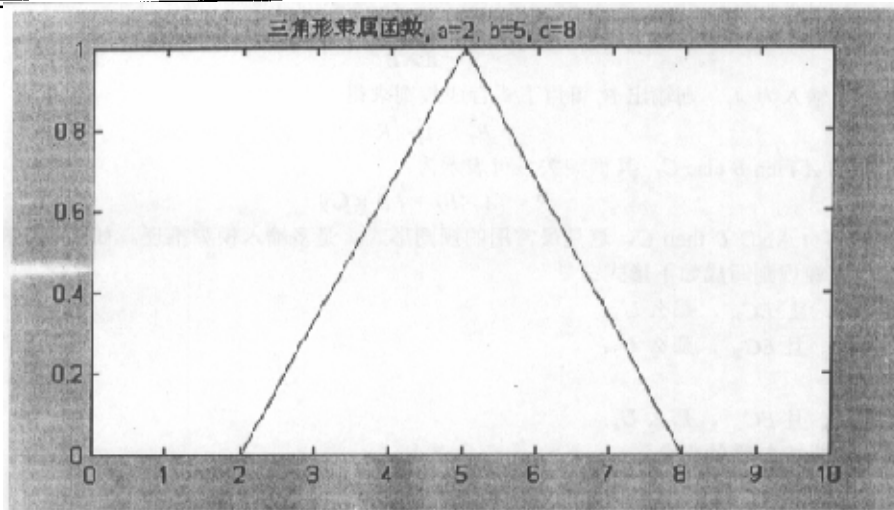


图 2-6 三角形隶属函数 ( $a=2, b=5, c=8$ )

吊钟形最理想，但计算复杂；最具有实用价值的是三角形和梯形函数。目前没有一种成熟有效的方法确定隶属函数，仍然依经验而定。研究表明：隶属函数的形状会很微妙地影响整个模糊系统的工作过程，例如模糊化、解模糊的时间、对查询表存储空间的要求。不过，用不同的模糊集合隶属函数，模糊逻辑控制可能都能实现预期目标，尽管达到目标的过程细节和响应时间可能有差别。换句话说，隶属函数的确定并不是唯一的，允许有不同组合。本研究采用三角形隶属函数。

设机组频率误差为  $e$ ， $e \in [-e_{\max}, +e_{\max}]$ ，将其模糊化后得到

$$E = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\},$$

式中“ $N$ ”表示“负”（Negative），“ $P$ ”表示“正”（Positive），“ $B$ ”表示“大”（Big），“ $M$ ”表示“中等”（Medium），“ $S$ ”表示“小”（Small），“ $Z$ ”表示“零（Zero）”。 $NM$ 表示“负中”，即误差为负且为中等程度大小，余类推。

频率误差变化率记为  $\dot{e}$ ， $\dot{e} \in [-c_{\max}, +c_{\max}]$ ，也用类似的方法模糊化得到

$$EC = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\},$$

式中各符号含义同上。

### 2.3.2.2 模糊控制规则设计

控制规则的设计是设计模糊控制器的关键<sup>[123, 130]</sup>。控制规则的建立有赖于对被控对象的了解和领域专家的知识。利用模糊集合理论和语言变量的概念，描述领域专家的控制经验便形成了模糊控制规则。一般可用条件语句加以描述：

(1) if  $A$  then  $B$ , 其模糊关系可表示为:

$$R = A \times B$$

若已知输入为  $A_1$ , 则输出  $B_1$  可用下式合成规则求得

$$B_1 = A_1 \circ R$$

(2) If  $A$  then  $B$  else  $C$ , 其模糊关系可表示为:

$$R = (A \times B) + (\bar{A} \times C)$$

(3) If  $A$  AND  $B$  then  $C$ , 这是最常用的规则形式, 是多输入模糊推理。如果一个模糊控制器的模糊规则写成如下形式:

如果  $E_1$  且  $EC_1$ , 那么  $U_1$ ;

如果  $E_2$  且  $EC_2$ , 那么  $U_2$ ;

.....

如果  $E_n$  且  $EC_n$ , 那么  $U_n$ ;

那么输出控制量的集合

$$U = (E \times EC) \circ R$$

即

$$\mu_U(x, y) = \vee \mu_R(x, y, z) \wedge \mu_E(x) \wedge \mu_{EC}(y)$$

将  $E$  及  $EC$  所有可能的组合和相应的控制策略汇总则得到模糊控制规则表。

表 2-1 模糊控制规则表

U \ EC	E	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB		NB	NB	NB	NM	NS	NS	O
NM		NB	NM	NM	NS	NS	O	O
NS		NM	NM	NS	NS	O	O	PS
O		NM	NS	NS	O	O	PS	PS
PS		NS	NS	O	O	PS	PS	PM
PM		NS	O	O	PS	PM	PM	PB
PB		O	O	PS	PM	PM	PM	PB

举例来说, 当误差为负而误差变化为正时, 系统本身已有减小误差的趋势, 所以为尽快消除误差但又不超调, 应取较小的控制量。余类推。控制变化总的原则是: 当误差大或较大时, 控制量的大小应以尽快消除误差为主; 而当误差较小时, 选择控制量要注意防止超调, 以系统的稳定性为主要出发点。

## 2.3.2.3 模糊推理及模糊量的非模糊化

在调速器中,对建立的模糊控制规则经过模糊推理决策出控制变量的一个模糊子集,它是一个模糊量而不能直接控制被控对象,还需要采取合理的方法将模糊量转换为精确量,以便最有效地发挥出模糊推理结果的决策效果,从而改善调节系统的动静态品质。把模糊量转换为精确量的过程称为非模糊化(defuzzification),或模糊决策、模糊判决,从数学上讲,就是将输出论域所定义的模糊控制作用空间映射到精确控制作用空间。遗憾的是目前尚无选择非模糊化的系统方法。常用的非模糊化方法有:最大隶属度法(Mean of Maximum, MOM),重心法(Center of Area, COA)。MOM方法简单、实时性好,突出了隶属度最大元素的控制作用,但对隶属度较小的其它元素却没有考虑,利用的信息少。COA方法使用广泛,其实质是找出控制作用可能性分布的重心。一般而言,用COA方法实现的模糊控制器比基于MOM方法的控制器产生的平均方差要低<sup>[123, 130]</sup>。上述非模糊化方法中,如果充分考虑利用模糊推理结果模糊子集提供的有用信息,就会导致计算繁琐,否则就会丢掉一些有用信息,因此,应在算法的复杂性和控制精度进行合理折中。本研究使用COA法。

## 2.3.3 基于解析控制规则的智能调速器

上述的模糊控制可以提高系统的鲁棒性,对系统参数和结构变化有较强的适应性。但是研究表明:量化因子和控制规则集的选取对系统性能影响很大,这些依赖于控制系统设计者对对象的特性的把握程度和控制理论的良好素养。但我国水电站星罗棋布,特性各异;电厂规模大小不一,工程技术人员素质参差不齐。因此,应探讨一种工程技术人员易于使用的控制参数调整方式,这样有利于产品的适应性。

针对上述问题研究的基本思路是:对理论性强且对人员素质要求高的控制器调整部分只对调速器设计、维护人员开放;需根据现场情况进行调整的参数向用户或运行人员开放,而且这些参数的调整规则应与他们的习惯基本一致。

首先,将模糊化和模糊决策部分封装起来,对用户来说是透明的,只有调速器设计者才可进行相应修改。在模糊化的过程中采取非线性映射。关于控制规则的设计,将工程技术人员熟悉的比例 $K_p$ 、积分 $K_i$ 、微分 $K_d$ 系数与模糊控制的相应组合联系起来,不追求精确的函数关系,而是概念上的类同。同时通过参数自整定,对控制规则的系数进行寻优。

设 $E$ 、 $C$ 、 $U$ 是经过量化的模糊变量,其相应的论域分别是频差、频差的变化率和接力器行程(即控制量),于是

$$U = \langle \alpha E + (M - \alpha)C \rangle \quad \alpha \in (0, M)$$

式中 $\alpha$ 为调整因子,或称加权因子, $\langle U \rangle$ 表示取一个与 $U$ 同号且最接近于 $U$ 的整数。若令 $\alpha = K_p$ ,  $M - \alpha = K_d$ ,则上式可改写成

$$U = \langle K_p E + K_d C \rangle$$

显然这类似于比例-微分 (PD) 表达式, 加权因子  $K_p$ 、 $K_d$  的含义相当于常规 PID 控制中的比例系数、微分系数的含义, 因而可在工业现场通过参数自整定确定  $K_p$ 、 $K_d$ 。从这里可以看出, 模糊控制因缺乏积分作用无法消除稳态误差, 这对于机组控制来说是无法接受的。因此, 在模糊控制的基础上引入智能积分, 在机组进入小偏差范围时智能积分发挥作用, 达到无差调节的目的 (图 2-7)。

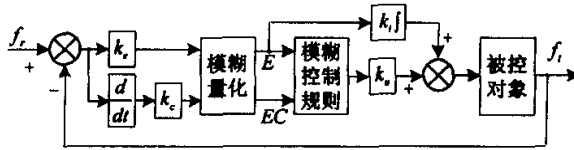


图 2-7 智能模糊控制调速器

## 2.3.4 控制效果对比

为了研究智能模糊调速器对控制效果的改进, 选择一被控系统, 用常规 PID 控制和智能模糊控制进行了对比仿真。结果表明: 后者可以使前者难以稳定的系统稳定下来, 并具有良好的鲁棒性。

### 2.3.4.1 被控系统

在各类水电机组中贯流机组惯性常数  $T_a$  小(例如 2~3s), 水流惯性时间常数  $T_w$  较大(例如 2~4s), 其控制系统调节品质较差, 并网较困难。如果贯流机组能得到较好控制, 其它类型的机组调节品质会令人满意。为了考察智能控制的效果, 对比仿真中取某贯流机组  $T_a=3.2s$ ,  $T_w=3.0s$ 。

### 2.3.4.2 PID 控制仿真试验

采用常规 PID 控制规律进行空载扰动试验, 结果表明系统难以稳定。用正交试验对参数进行优选, 得到  $K_p=0.5$ ,  $K_i=0.2$ ,  $K_d=0.2$ , 从示波图 (见图 2-8) 中可以看出, 虽然可以稳定, 但超调量大, 过渡过程较长。通过对该被控系统分析不难发现, 该系统参数已超出国家标准规定范围 (GB/T 9652.1-1997 适用条件是:  $T_w \geq 4s$ ,  $T_a \leq 4s$ 、 $T_w/T_a \geq 0.4$ ), 故仿真结果并不令人意外。



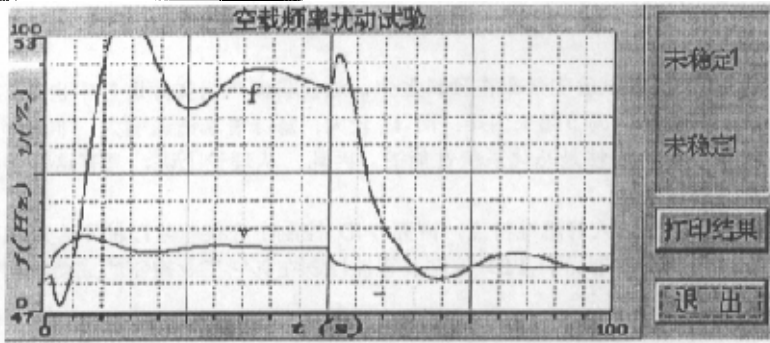


图 2-8 常规 PID 空扰试验示波图

### 2.3.4.3 智能控制仿真试验

在  $T_s$  较小、 $T_w$  较大时，试验证明用常规 PID 控制时系统振荡厉害，过渡过程时间长。这与电站实际情况是一致的，正因为如此，国标 GB/T 9652.1-1997 明确标出了其使用范围。

在同样的被控对象下，采用智能控制代替 PID 控制，进行了对比试验（图 2-9）。从示波图中可以看出，系统超调小，稳定时间较短。上扰 4Hz 时超调量  $M_p=4.10\%$ ，调节时间  $T_s=37.44s$ ，振荡次数  $N=0.5$ ；下扰 4Hz 时超调量  $M_p=3.57\%$ ，调节时间  $T_s=36.36s$ ，振荡次数  $N=0.5$ 。

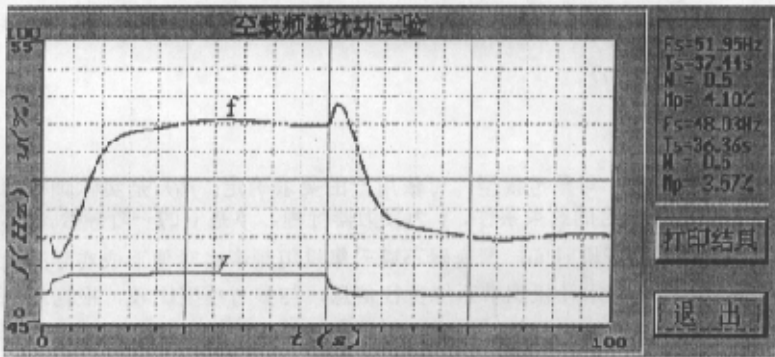


图 2-9 智能控制空载试验示波图

## 2.3.4.4 结果分析

上述常规 PID 控制试验的效果在预料之中，这在贯流机组实际运行中也得到反映。 $T_c$  较小，即机组的惯性小，调节起来困难；而  $T_w$  较大，意味着水击影响大，非最小相位特性影响大，而非最小相位特性是恶化系统性能的。因此，从理论上讲，具有这种参数的系统难以具有好的控制性能。

而智能控制可以模仿人的思维特点，摒弃 PID 控制中在某些阶段的不合理成分，因而从理论上可以预料控制效果优于 PID 控制。智能控制在其它工业控制的成功应用也已证明了这点。

## 2.4 智能开机策略

就调速器工作而言，水轮机开机过程是重要的考验之一。一方面电站希望调速器能快速开机、并网，减少空载损耗；另一方面在开机过程中因机组残压较低、现场干扰严重、开机参数设定不合适容易造成开机失败。早期的调速器按设定开度开机（开环开机），因不能反映水头变化容易造成超速或开不起来。后来引入水头信号修正开机时的导叶开度（仍是开环开机），使开机过程得到了改善。但因或者水头信号故障或者不准，或者无各水头下的较优开机开度，上述问题仍然不同程度的存在。问题的关键是：必须减少开机对水头信号和设定开度的依赖程度。本文提出用参考模型实现智能开机控制以确保成功地快速开机。

所谓参考模型就是希望的开机曲线，可依用户的要求确定。智能开机的数学模型为：

$$\text{目标函数: } J = \int_0^{T_c} [f_d - f(t)]^2 dt \Rightarrow \min$$

$$f_d = f_d(t, T_{cd})$$

$$\text{约束条件: } D_1(y) \leq 0$$

$$D_2(\dot{y}) \leq 0$$

$f_d$  是希望的开机规律，即参考模型，可依用户的要求确定； $f(t)$  是实际频率曲线。函数  $D_1$ 、 $D_2$  是控制量必须满足的约束条件， $y$  为接力器行程， $\dot{y}$  是  $y$  的一阶导数， $T_{cd}$  是希望的开机时间， $T_c$  是实际的开机时间。调速器不断采集机组频率实时值形成实际开机曲线，根据已经历的动态过程提取水轮机调节系统特征信息，与参考模型比较，根据最优目标函数实时校正导叶开度，从而达到开机过程快、超调小的希望特性。这样，不论给定的初始开度是否准确，最终成功地以近似  $f_d$  曲线完成开机过程（图 2-10）。

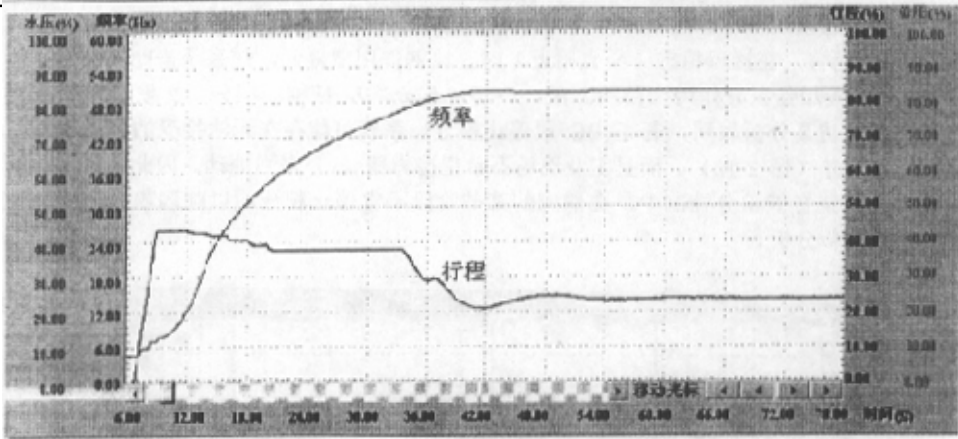


图 2-10 智能开机过程波形

## 2.5 智能积分控制

为了研究在动态过程中如何通过控制参数的变化达到较理想的控制效果，有必要先研究常规 PID 控制规律下抽水蓄能机组调节系统阶跃响应特征。

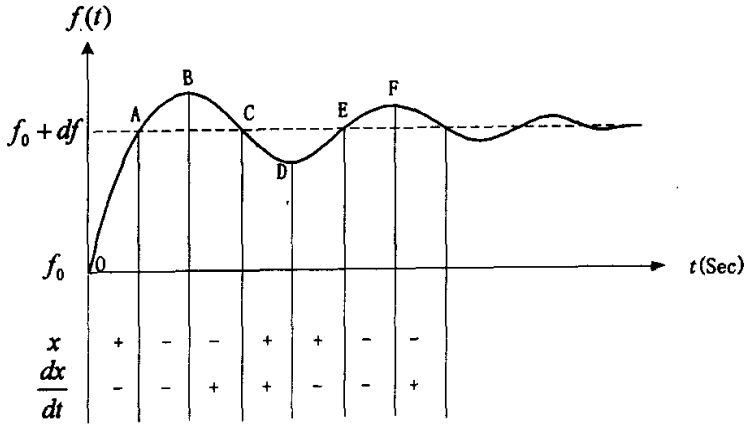


图 2-11 常规 PID 控制下抽水蓄能机组调节系统水轮机工况阶跃响应

设抽水蓄能机组调节系统处于频率为 50Hz 的稳定的水轮机工况 ( $f_0$ ) 时指令信号阶跃变化  $df$  (比如 +2Hz)，根据自动控制原理，理想的响应过程应该是  $1(t)$ ，即：也是阶跃变化。由于系统总存在惯性并且输入到系统的能量有限，理想响应过程无法实现。但近似获得理想响应是控制系统设计者的追求目标。一般说来，在阶跃输入作用下系统的响应是一衰减的振荡过程 (如图 2-11)，频率用相对偏差值  $x$  表示， $x = (f(t) - f_0 - df) / f_0$ 。仔细研究不难

发现，在整个过渡过程中一组 PID 参数难以获得理想的特性<sup>[123]</sup>。在 OA 段， $x > 0$ ， $dx/dt < 0$ ，仅就比例而言，在接近稳态（A 点附近）时，比例作用要降低，使系统借助于惯性继续上升；AB 段应加强积分作用；在 BC 段， $x < 0$ ， $dx/dt > 0$ ，应削弱积分（文献[123]认为应停止积分）。仿真分析表明，若在 BC 段停止积分，系统可能存在无法接受的稳态误差，或动态特性变差（图 2-12）。而且工业现场不希望接力器（ $y$ ）来回抽动。因此，在抽水蓄能机组调节系统智能积分控制中，在响应的某些阶段不宜停止积分，以削弱积分为佳。其它可以进行类似分析。

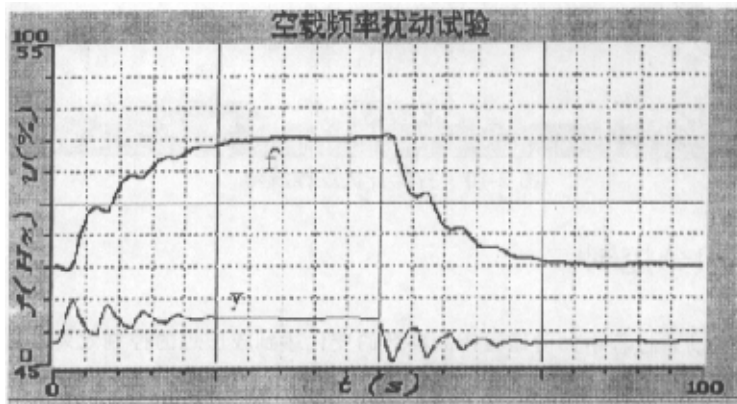


图 2-12 在某些阶段停止积分抽水蓄能机组调节系统水轮机工况阶跃响应

通过对抽水蓄能机组调节系统动态过程分析，本研究提出利用动态过程特征信息进行启发和直觉推理，在不同过程段采用不同积分策略的智能积分控制，从而实现有效控制，但智能积分在各个阶段都存在，只是强度不同罢了（出现积分饱和的情况则另行处理）。采用智能积分的抽水蓄能机组调节系统阶跃响应如图 2-13。

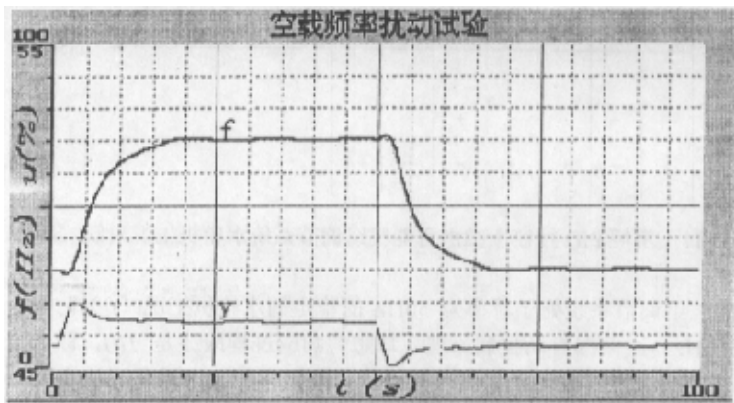


图 2-13 采用智能积分的抽水蓄能机组调节系统水轮机工况阶跃响应

## 2.6 步进电机智能防失步诊断与控制

在调速器中,电液转换器是影响可靠性的主要因素之一。其主要原因是油质不够干净,导致电液转换器发卡。本文在研究基于可编程计算机控制器的调速器时用步进电机替代电液转换器,由于步进电机的力比电液转换器大得多,而且不用油,彻底解决了发卡问题,大大提高了可靠性,维护量也降到最小,深受用户欢迎。但是,步进电机在高速旋转时的负载能力不够大,容易造成电机失步,其表现是:有电机旋转指令,但电机不动。步进电机失步对机组安全是一大威胁。试想一旦遇到甩负荷而调速器因失步拒动,将引起机组超速而紧急停机。本文用智能诊断技术对步进电机失步进行诊断与控制。

电机的失步就是一段时间里电机有旋转指令但停止转动。在一个电机控制周期内电机旋转而产生的直线距离是很小的,在传感器精度有限且存在测量噪声的情况下很难确切知道电机是否按要求运动,但通过一段时间的“观察”,不难判断电机的失步情况。本文通过窗口移动技术诊断电机是否失步:

$$|y(k+l)-y(k)| < \delta, \text{ if } |V(k-j)| \neq 0$$

式中  $y$  是接力器行程,  $V$  是控制指令,  $l$  是窗口宽度,  $k$  是采样时刻,  $j > 0$ 。一旦诊断出失步现象,则以某种速度重新启动电机。经过如此处理,电机可自动从失步状态中恢复。在失步不严重时,外界几乎感觉不到失步曾经发生。

## 2.7 小结

包括古典控制理论和现代控制理论的传统控制是基于模型的控制,对抽水蓄能机组调节系统这一类快时变、严重非线性、非最小相位高阶控制系统,难以在较大范围内获得另人满意的效果,而智能控制则提供了充满希望的诱人前景。本章在讨论智能控制方法和特点的基础上提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统的智能模糊控制策略。它基于解析控制规则,具有智能积分,有效消除了调节偏差。将模糊化和模糊决策部分封装起来,对用户来说是透明的,只有系统设计者才可进行相应修改。将工程技术人员熟悉的比例  $K_p$ 、积分  $K_i$ 、微分  $K_d$  系数与模糊控制的相应组合联系起来,不追求精确的函数关系,而是概念上的类同。与PID控制的对比仿真试验表明:优于PID控制,鲁棒性好。

用步进电机进行信号转换解决了电液转换器容易发卡、漂移等问题,但处理得不适当容易失步。为此,提出了一种步进电机失步的智能诊断与控制策略,现场运行证明正确、有效。实现了不依赖电站运行水头和空载开度的智能闭环开机策略,解决了目前调速器中开环开机规律依赖水头和空载水头的缺点。

这些智能控制策略也可用于常规机组的调节与控制。

## 3 分布式面向环节的抽水蓄能机组 建模与仿真

**摘要:** 本章在分析传统建模与仿真方法特点基础上, 提出分布式、面向环节的、可视化抽水蓄能机组调节系统建模与仿真。开发了基于 MATLAB with SIMULINK 的开放式可视化模型库和图形用户接口, 借助于鼠标便可完成系统组态, 其仿真结果以动态曲线和性能指标两种形式呈现, 便于定量分析、比较。最后在该仿真平台上研究了水轮机调节系统在孤网运行中的稳定性。

### 3.1 面向环节的建模

传统的建模方法是: 根据已有的定律和定理推导出整个控制系统或整个被控对象的数学模型, 以状态方程或其它形式表示。这样建模的好处是仿真计算省时, 其缺点显而易见: 模型一旦建立, 则难以改变, 甚至某些环节的参数都难以改变。而水电机组控制系统很难建立统一的数学模型, 其原因在于水电站个性太强, 特别是压力引水管道各式各样, 依当地的地质、地貌、地形而建。本文提出分布式面向环节的建模方法, 试图解决这一难题。

众所周知, 一个控制系统是由被控对象和控制器组成, 而每一部分又由不同的部件或对象或环节构成。对于抽水蓄能机组控制系统来说, 控制装置是调速器, 被控对象按其物理位置和功能分为水泵-水轮机、发电机-电动机、压力引水管道、电网和负载等 4 大部分 (图 3-1)。在面向环节的建模方法中, 首先建立各个环节的数学模型, 对其封装后形成环节模块库, 仿真系统模块库的设计者必须知道各环节的动作机理, 并对其进行数学抽象; 但模块库的使用者或者仿真系统的设计者则不必知道如何推导各环节的数学模型, 把它作为一个黑箱 (Blackbox) 处理即可, 只需知道其输入、输出是什么。某个具体系统的模型可以用鼠标象搭积木一样构建, 然后通过人-机交互输入相关参数, 点击“开始仿真”按钮, 系统自动仿真, 最后以可视化的方式输出仿真曲线和相应的性能指标。

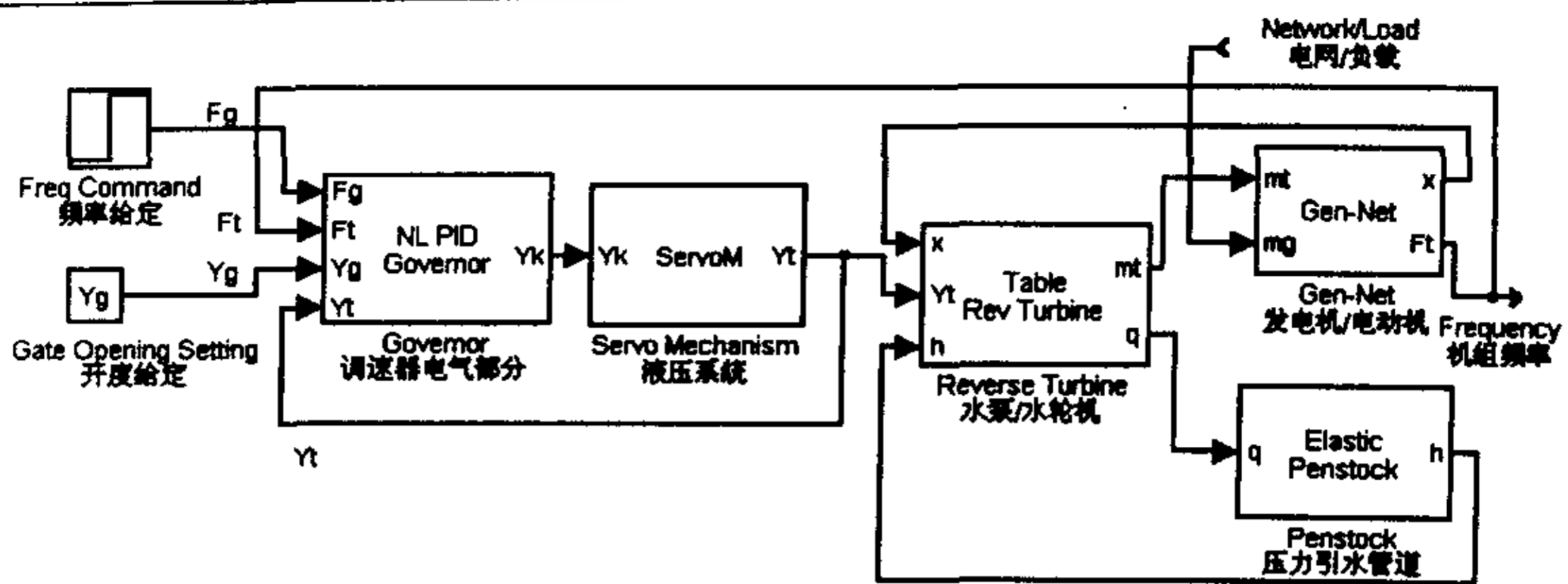


图 3-1 抽水蓄能机组调节系统构成

### 3.2 MATLAB with SIMULINK 开发平台

1980 年美国的 Cleve Moler 博士研制的 MATLAB (MATrix LABoratory, 即矩阵实验室) 环境 (或语言) 对后来的控制系统设计及计算机辅助设计技术起到了巨大的推动作用。由于该软件的使用极其容易, 而且提供了丰富的矩阵处理功能, 所以控制领域的研究人员很快就注意到了这个特点, 在它的基础上由各个公司、大学等机构组织开发而形成了众多的、功能强大的控制理论与 CAD 专门的应用程序集 (又称工具箱 Toolbox), 使之很快在国际控制界流行起来。目前它已经成为国际控制界最流行的语言了。不仅如此, MATLAB 还在诸如数学、宇航、图像信号处理、生物医学工程、信号分析、时序分析与建模、优化设计等领域有着广泛的应用, 并且出现了 30 多种工具箱, 而这些工具箱反过来又进一步促进了 MATLAB 的应用。可以说 MATLAB 具有极其可靠的数值运算 (特别是、但不局限于矩阵运算), 表现出一级高级语言难以比拟的优势。

MATLAB 的 SIMULINK 是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包, 它支持连续、离散及两者混合的线性和非线性系统, 也支持具有多种采样速率的多速率系统。它为用户提供了用方框图进行建模的图形接口, 与传统的用微分方程和差分方程的仿真软件包相比, 具有直观、方便、灵活的优点。SIMULINK 包含有 Sinks (输出方式)、Source (输入源)、Linear (线性环节)、Nonlinear (非线性环节)、Connections (连接与接口) 和 Extra (其他环节) 等子模型库, 而且每个子模型库中包含有相应的功能模块, 用户也可以定制和创建自己的模块。

用 SIMULINK 创建的模型可以具有递接结构, 因此用户可以采用从上到下或从下到上的结构创建模型。在定义完一个模型后, 用户可以通过 SIMULINK 的菜单或 MATLAB 的命令窗口键入命令来对它进行仿真。菜单方式对于交互式工作非常方便, 而命令行方式对于运行一大类仿真非常有用。采用 Scope 模块和其他的画图模块, 在仿真进行的同时, 就

可以观察到仿真的结果。除此之外，用户还可以在改变参数后迅速观看系统中发生的变化情况。仿真的结果还可以存放到 MATLAB 的工作空间 (Workspace) 以便事后处理。它也可以通过 DDE 等形式与其它应用程序进行数据交换，以客户——服务器方式既可以使其它用户程序共享其资源，又可使自己充分利用第三方软件在其它方面的优势。而且 SIMULINK 以可视化形式建立系统或环节的模型，从而快速研究系统方案。不仅如此，还可直接生成可执行代码，从而大大提高开发效率和开发速度。

不过，它无法显示动态系统的性能指标，而且无法交互修改系统参数，需要仿真研究者具备一定的建模技巧与经验。本章选择在 MATLAB 5.3 上开发抽水蓄能机组调节系统仿真平台，充分利用 MATLAB with SIMULINK 的强大功能，同时弥补上述不足，使普通的工程技术人员也可使用功能强大的仿真工具。该平台具有通用性、可扩充性、开放性，有助于缩短产品研发周期，增强市场竞争力。

## 3.3 抽水蓄能机组面向环节的建模与仿真

研制面向环节的抽水蓄能机组调节系统仿真平台的目的是让研究人员或一般工程技术人员可利用它深入了解抽水蓄能机组调节原理，研究、设计机组控制规律，辅助控制系统设计；调速器维护人员可用于故障分析、诊断；也可用于调速器技术人员培训，帮助掌握基本操作技能、认识控制规律、了解各控制参数的物理意义和控制作用、学会现场整定控制参数的技巧。借助于该仿真平台将减少新产品成本和投入市场的时间；电厂为了设备安全起见，设备在正常运行时不许动手，而一旦发生事故，则往往手忙脚乱，因此，运行人员和维护人员很难从中学到处理故障的方法和技巧；另外，有些故障极少发生，但一旦发生，则可能导致机组事故和损坏。通过仿真，这些问题迎刃而解，帮助提高识别、排除故障的能力。

### 3.3.1 仿真平台功能及构成

面向环节的抽水蓄能机组调节系统仿真平台是可视化建模、仿真平台，充分考虑到用户的实际需求和潜在需求，具有易用性、开放性、可扩充性。现已开发如下功能：

(1) 用户用鼠标象搭积木一样构造仿真模型，建立具体的系统模型后用户可对任意工况进行仿真，此外，只要点击鼠标可对如下几类重要的工况自动进行仿真：

- 空载扰动；
- 机组启动（开机）；
- 甩负荷；
- 孤网运行。

(2) 交互式修改控制系统参数和仿真参数；

(3) 保存当前仿真工况的参数和仿真得到的性能指标；



(4) 显示关键变量的动态曲线;

(5) 计算动态过程的性能指标以供比较、选择。

该仿真平台基于 MATLAB 5.3 用 MATLAB 语言和 SIMULINK 开发, 由可视化模型库、用户界面、仿真参数设置界面、动态曲线显示界面、可视化系统模型等部分构成。

## 3.3.2 系统建模

传统的抽水蓄能机组调节系统仿真的主要特点是: ①机组特性采用线性化模型。为了简化模型, 在稳态工况附近线性化, 然后写出状态方程。这种方法的特点是: 改变模型困难, 若系统的某个环节不同于所建模型, 则整个模型须重写。②压力引水系统采用基于特征线法的模型。其特点是: 模型较精确, 可以考虑复杂的边界条件。但具有模型可重用性差的致命缺点。现在有人用 MATLAB 建模, 充分利用了其可视化的特点, 但是使用者仍须具有较深的专业知识才能构造出系统模型, 而且无法直观地定量分析不同控制规律对系统性能的影响。

从模型层面来讲, 很多人对抽水蓄能机组调节系统的内部结构并不熟悉, 即使是专业人员, 在维护、修改自己编制的仿真模块程序时常常遇到困难。也就是说, 他们无法用 SIMULINK 提供的基本模型库“搭建”出抽水蓄能机组调节系统仿真模型。有鉴于此, 本章在 SIMULINK 可视化模型库的基础上, 建立了抽水蓄能机组调节系统模型库, 将调节系统分成调速器电气部分、机械液压系统、水泵-水轮机、发电机-电动机、电网、压力引水管道等环节, 而每一个环节可以有不同的模型, 以水泵-水轮机为例, 有适用于抽水蓄能机组的可逆式水泵-水轮机模型, 有适用于常规机组的多种水轮机模型, 如理想水轮机、线性水轮机、非线性水轮机、C++水轮机模块, 等等, 用户可以根据自己的仿真目的和可得到的原始参数选择最适合的模型。这样, 用户无须较多的专业知识, 象搭积木一样构成抽水蓄能机组调节系统。该可视化模型库具有开放性, 用户可添加自己的专用模型。

### (1) 调速器电气部分模型

调速器按其物理构造可分为电气部分和机械液压系统。最常用的调速器电气部分模型是 PID 控制规律:

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$$

式中,  $K_p$  是比例增益,  $K_i$  是积分增益,  $K_d$  是微分增益。理论分析和实际应用表明: 上述的具有理想微分的 PID 效果并不好, 通常实际微分环节具有良好的控制效果:

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + \frac{K_d s}{1 + T_d s}$$

式中,  $T_d$  是微分时间常数。对抽水蓄能机组调节系统而言, 一组控制参数难以获得良好的控制性能。当运行点 (以水头  $H_0$ 、开度  $Y_0$  表征) 变化时控制参数随之变化, 即非线性 PID 调速器:

$$G(s) = K_p(H_0, Y_0) + K_i(H_0, Y_0) \frac{1}{s} + \frac{K_d(H_0, Y_0)s}{1 + T_d s}$$

对于复杂的智能控制规律，若用 SIMULINK 实现，则显得复杂、冗长，可读性差；若用 MATLAB 语言，则简洁、清晰、明了。问题是：MATLAB 语言自成体系，有自己的语法规则，与 C 语言不兼容。因此，开发了 C++ 语言与 SIMULINK 的接口模块“C++调速器”，供熟悉 C 语言的用户使用。C++ 调速器模型提供了 C 语言与 MATLAB 的输入-输出接口，如有必要，使用者只需根据 C 语言语法规则修改其内核函数 ControlLaw(void) 即可。

这样，在可视化模型库中调速器电气部分模型有 4 个：理想 PID 调速器、实际 PID 调速器、非线性 PID 调速器和 C++ 调速器（图 3-2），它们的共同特点是：输入输出相同，因此仿真使用者根据自己的需要挑选其一组态，不必考虑与其它模块的接口和匹配关系。当然，由于该库具有开放性，用户可以按规则添加自己的模型。

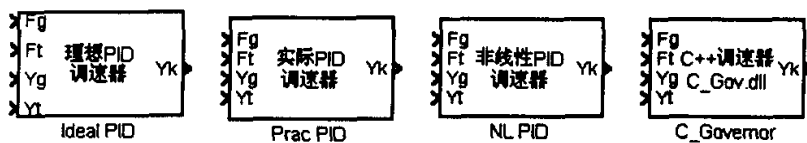


图 3-2 调速器电气部分模型库

## (2) 液压系统模型

液压系统的简化模型可以表示为一阶惯性环节：

$$G(s) = \frac{1}{1 + T_y s}$$

式中， $T_y$  为接力器反应时间。但是，液压系统具有不可忽视的死区和限幅，不考虑这些本质非线性，将严重扭曲实际情况。考虑非线性的模型见图 3-3。

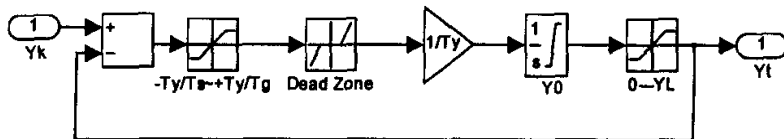
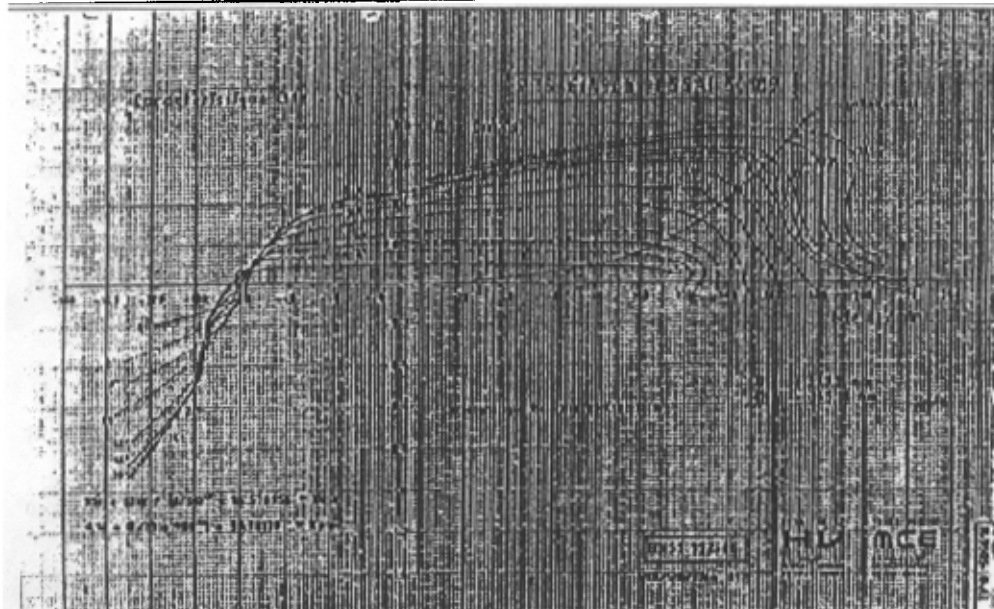
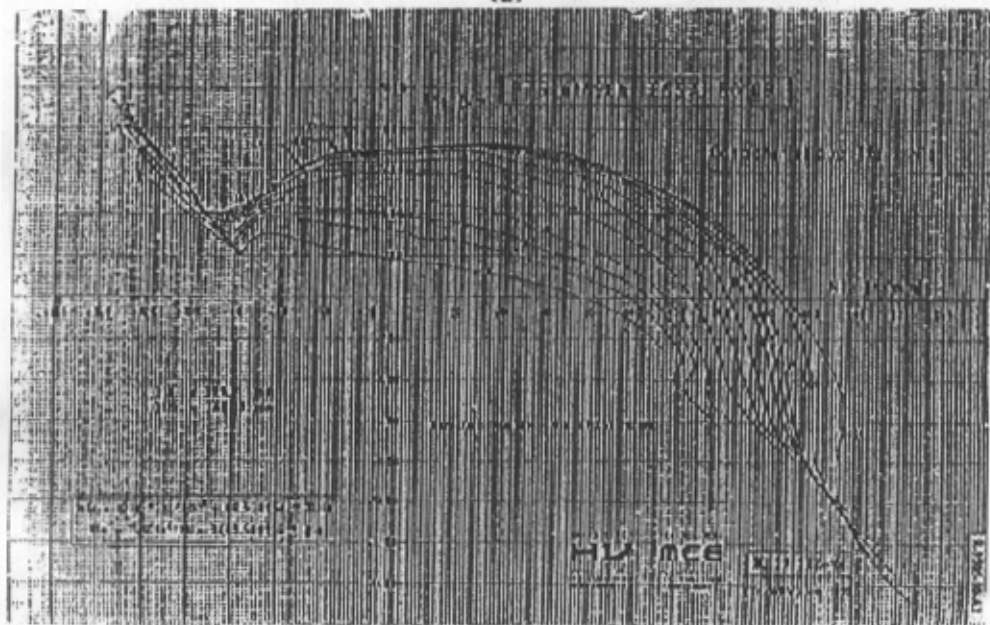


图 3-3 液压系统模型

## (3) 水泵-水轮机模型



(a)



(b)

图 3-4 某抽水蓄能机组全特性曲线：(a) 流量特性，(b) 力矩特性

抽水蓄能机组大多是混流式。混流式水泵-水轮机是一复杂的非线性部件（或环节），通常用模型机组的具有四象限的全特性曲线图表示（如图 3-4）。图 3-4（a）所示的流量特性呈“S”形，在同一单位转速下，可有 3 个不同的单位流量（其中一个为负值），这对机组调节性能有较大影响。从四象限特性曲线可以看出，水泵-水轮机具有 5 个主要工况区：水轮机工况、水轮机制动工况、水泵工况、反水泵工况、水泵制动工况。

已知机组的实时转速、实时开度、实时水头容易转换为图中的单位转速和导叶开口，从而获得实时单位流量、单位力矩，再换算为实时流量和力矩。水泵-水轮机或水轮机可看成为一多输入多输出（MIMO）环节（Table Rev Turbine, Table Turbine, 见图 3-5）：

$$q(t) = f_q(x, Y_t, h)$$

$$m_t(t) = f_{m_t}(x, Y_t, h)$$

式中， $x$  是机组转速相对偏差值， $Y_t$  是导叶开度， $h$  是水头相对偏差值， $q$  是机组流量相对偏差值， $m_t$  是机组力矩相对偏差值。有时为了研究问题方便起见，特别是在水轮机工况，将这个表达式在稳态运行工况点附近线性化，上式可简化为（6 系数水轮机，6-Argu Turbine）：

$$q(t) = e_{qx}x + e_{qy}y + e_{qh}h$$

$$m_t(t) = e_x x + e_y y + e_h h$$

系数  $e_{qx}$ 、 $e_{qy}$ 、 $e_{qh}$ 、 $e_x$ 、 $e_y$ 、 $e_h$  随工况点变化。在此基础上，可进一步得到理想水轮机模型（Ideal Turbine）和 C++ 水轮机模型，推导在此从略。

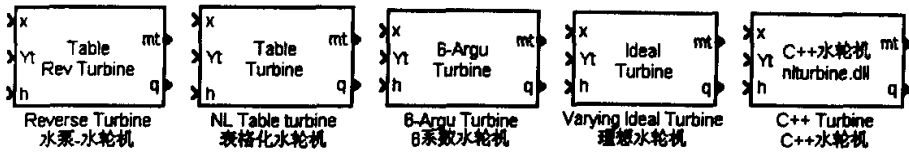


图 3-5 水泵-水轮机模型库

## （4）引水管道模型

压力引水管道是抽水蓄能机组调节系统最具特色的环节。很难用一个统一的数学模型表示，可一般地表示为：

$$h(t) = f(q(t))$$

在单管单机的情况下，考虑弹性水锤的引水管道模型（Elastic Penstock）为：

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -2 \frac{T_w}{T_r} th(0.5T_r s)$$

式中， $T_w$  为水流惯性时间常数， $T_r$  为相长。可以看出该传递函数是非线性的，是一个双曲正切函数。将其线性化得到刚性水锤模型（Rigid Penstock）：

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -T_w s$$

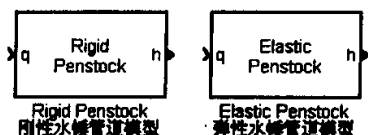


图 3-6 引水管道模型

### (5) 发电机-电网模型

发电机和电网的模型可以合在一起：

$$(T_a + T_b) \frac{dx}{dt} = m_l - m_g - e_g x$$

式中， $T_a$  为机组惯性时间常数， $T_b$  为负载惯性时间常数， $m_g$  为负载力矩的相对偏差值， $e_g$  为负载自调节系数。

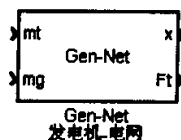


图 3-7 发电机-电网模型

### (6) 干扰模型

为了考察控制系统的鲁棒性和控制性能，需要研究系统加入干扰后的响应以及需采取的措施。常用如图 3-8 所示的白噪声模型（Band-Limited White Noise）。

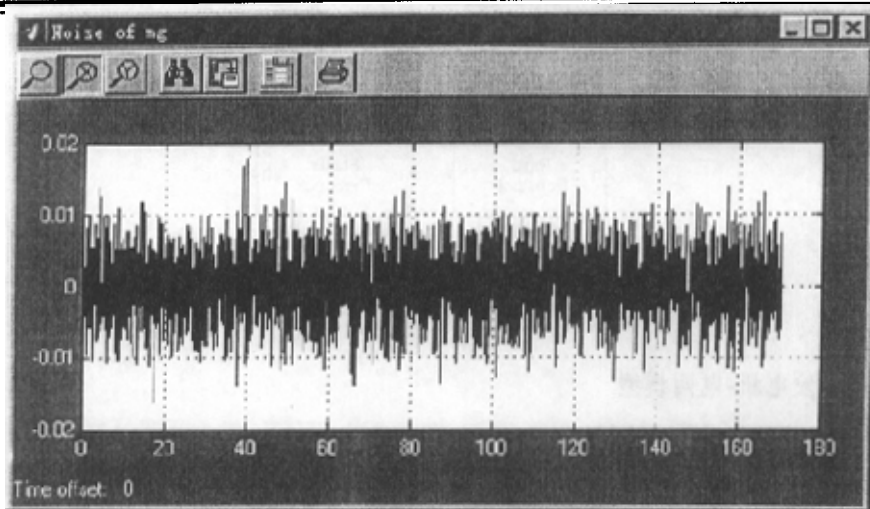


图 3-8 白噪声波形

当然还有常用的单位阶跃函数 (Step)、单位斜坡函数 (Ramp)、正弦波 (Sine Wave)、脉冲发生器 (Pulse Generator) 等 (图 3-9), 由 SIMULINK 提供。

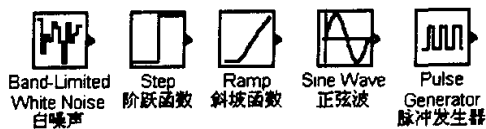


图 3-9 干扰模型

### (7) 负载模型

通常用阶跃形式的信号模拟负载的变化:

$$m_g = m_{g0}1(t)$$

式中,  $1(t)$  是单位阶跃函数,  $m_{g0}$  是负载的变化幅值。

为了方便用户使用仿真平台, 还开发了系统专用模板 (样板模型), 用户可以直接对其修改形成自己的仿真系统 (图 3-10)。

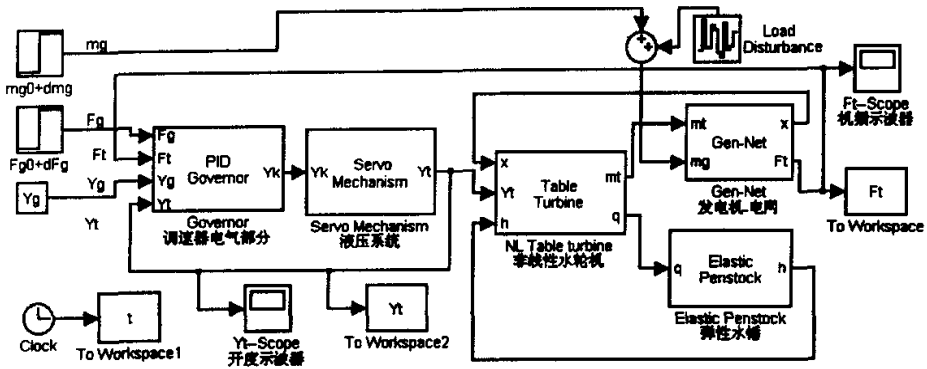


图 3-10 水电机组控制系统样板模型

### 3.3.3 图形用户接口 GUI

用户友好的图形化人-机界面 (GUI) 是影响一个软件质量的重要方面。抽水蓄能机组调节系统仿真平台的 GUI 由主界面、仿真参数界面和动态曲线显示界面构成。用户可通过该仿真平台的主界面 (图 3-11) 交互地选择控制系统模型、系统参数、初始工况、仿真类别、仿真参数 (如修改缺省的仿真步长, 仿真时间)、控制器参数。用户所选择的上述参数均可通过“保存数据”菜单加以保存, 供下次使用。根据仿真结果自动计算出的性能指标也显示在图形界面中, 用户可以定量地比较不同控制参数、不同扰动、不同被控对象时系统的动态响应。

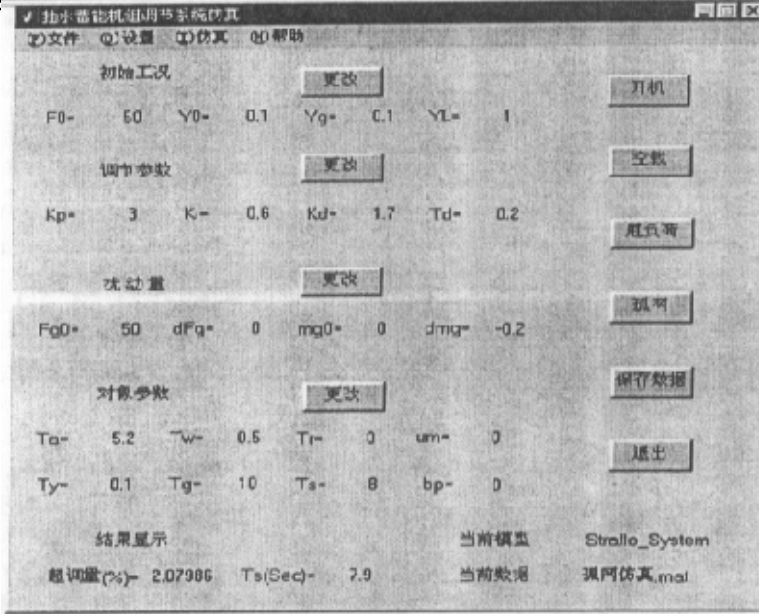


图 3-11 图形用户接口 GUI

根据用户选择的仿真类别，系统自动弹出相应的仿真参数对话框，供用户修改、确认仿真参数（图 3-12）。



图 3-12 仿真参数界面之一

当仿真完成后，仿真系统除自动计算相应的性能指标外，还显示出机组频率 ( $F_t$ , Hz)、导叶开度 ( $Y_t$ ) 与时间 ( $t$ , s) 的关系曲线（图 3-13 是频率给定发生+4Hz 扰动时机组频率



$F_r$ 和导叶开度  $Y$ 动态曲线的示例), 具有 ZOOM 功能, 可对频率曲线进行局部放大后进行精确、定量分析, 并且可打印或拷贝到剪切板, 供其它程序使用。

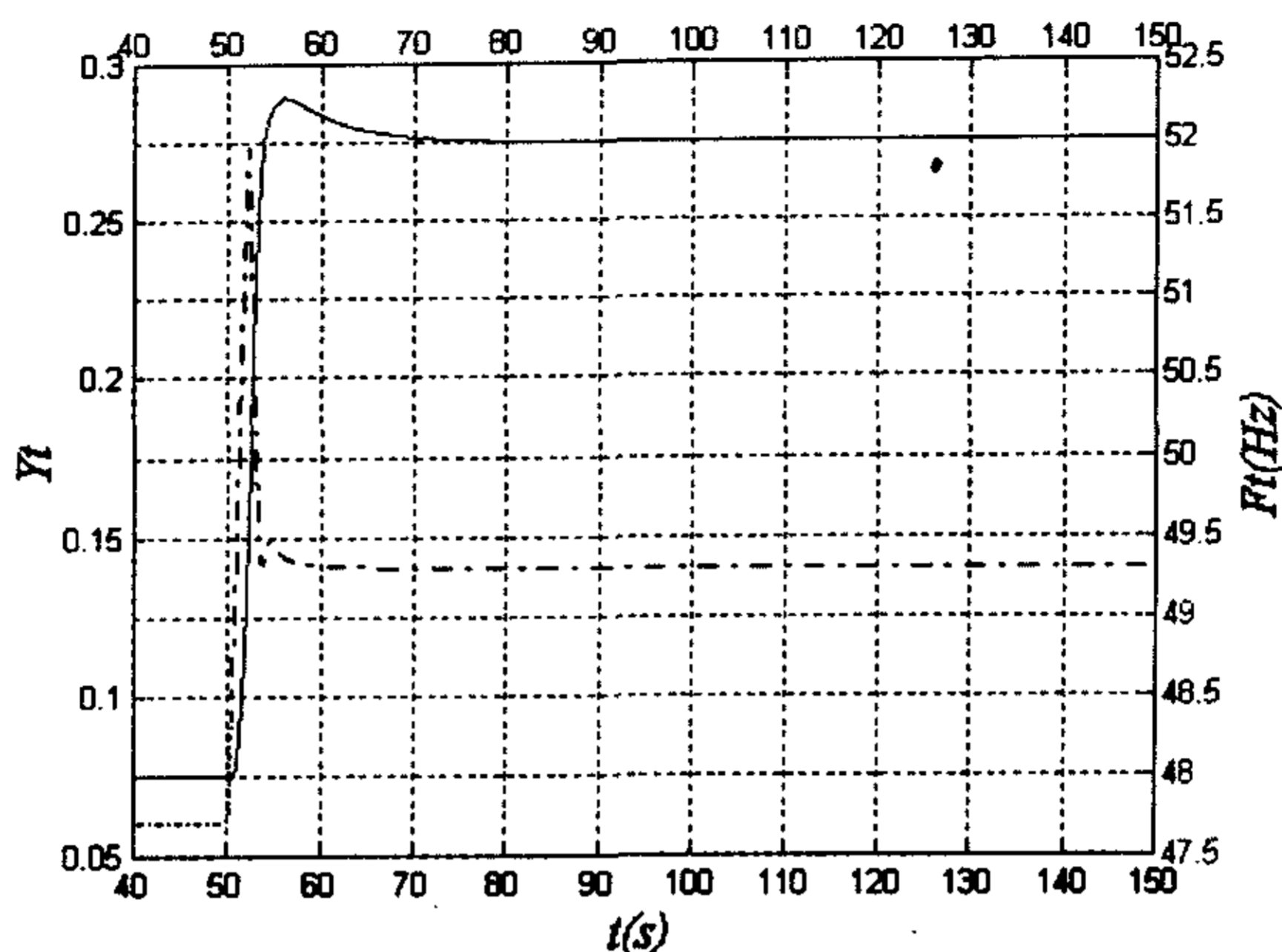


图 3-13 动态曲线示例

## 3.4 仿真平台应用

我国经济地区发展不平衡现象严重, 因此, 电网的建设各地区差别较大。很多水电站当与大电网解列后, 带地区负荷孤网运行。机组在孤网中运行与在大电网中运行很不一样, 其稳定性和调节品质受到很大挑战。不少机组在孤网中难以稳定运行, 给当地经济带来不良影响。为此, 需要解决机组带孤立负荷的稳定性问题。下面在上述抽水蓄能机组调节系统仿真平台上研究调速器孤网稳定性, 仿真所用被控对象主要参数如下:  $T_a+T_b=10$ ,  $T_w=3$ ,  $e_x=-0.5$ ,  $e_y=1$ ,  $e_h=0.75$ ,  $e_{qx}=0$ ,  $e_{qy}=1$ ,  $e_{qh}=0.25$ ,  $Y_0$  (初始稳定开度)  $=0.5$ 。仿真中在  $t=50s$  时加入扰动, 超调量  $M_p$  和调节时间  $T_s$  分别定义如下:

$$M_p = \begin{cases} \frac{F_{\min} - F_r}{F_r} \times 100\%, & \text{负荷突增时} \\ \frac{F_{\max} - F_r}{F_r} \times 100\%, & \text{负荷突减时} \end{cases}$$

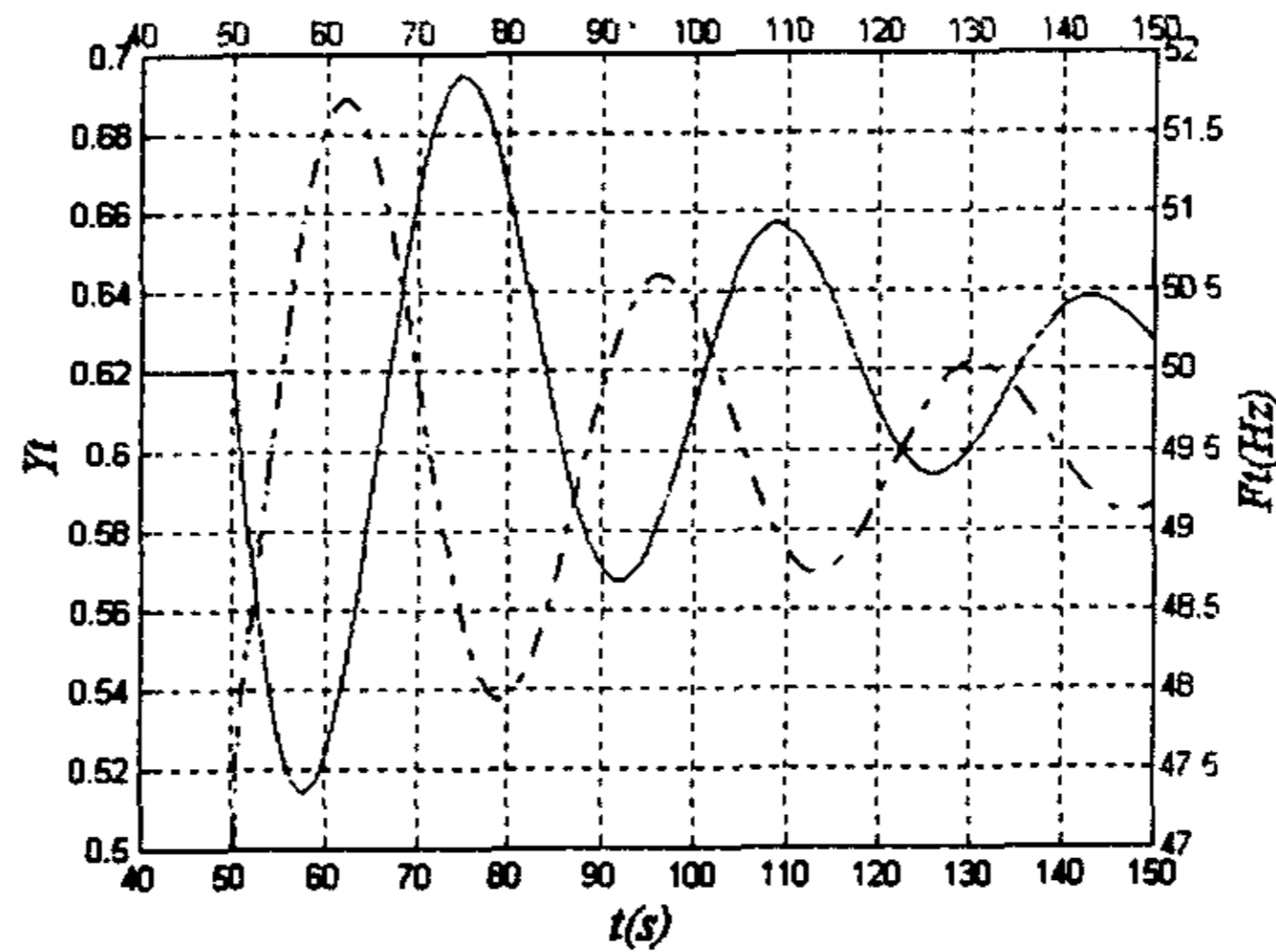
$$\frac{|F(t) - F_r|}{F_r} \leq 1\%, \quad t \geq T_s + 50$$

式中,  $F_r$  (额定频率) = 50Hz,  $F(t)$  是实时电网频率,  $F_{\min}$ 、 $F_{\max}$  分别是电网频率波动的最小值 (负荷突增时) 和最大值 (负荷突减时)。

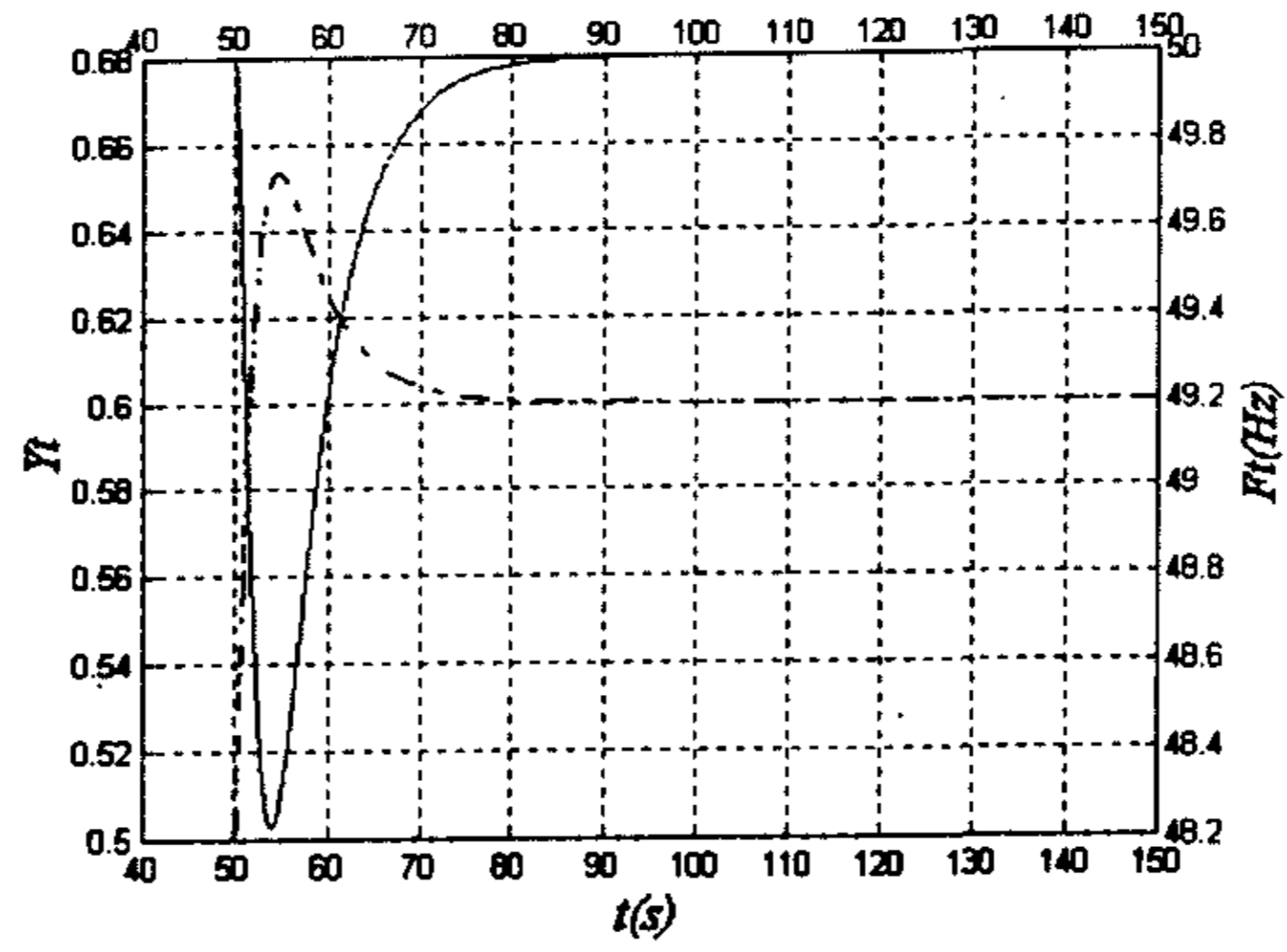
机组在孤网运行时, 控制器的被控对象特性与在大电网时差别较大, 如仍维持大电网时的控制参数不变, 则很难保持系统的稳定性, 更不用说性能了。那么, 在孤网运行时控制参数如何整定? 图 3-14 的仿真曲线及表 3-1 所示性能指标表明: 适当增加  $K_p$  有助于系统稳定!

表 3-1  $K_p$  对孤网稳定性的影响

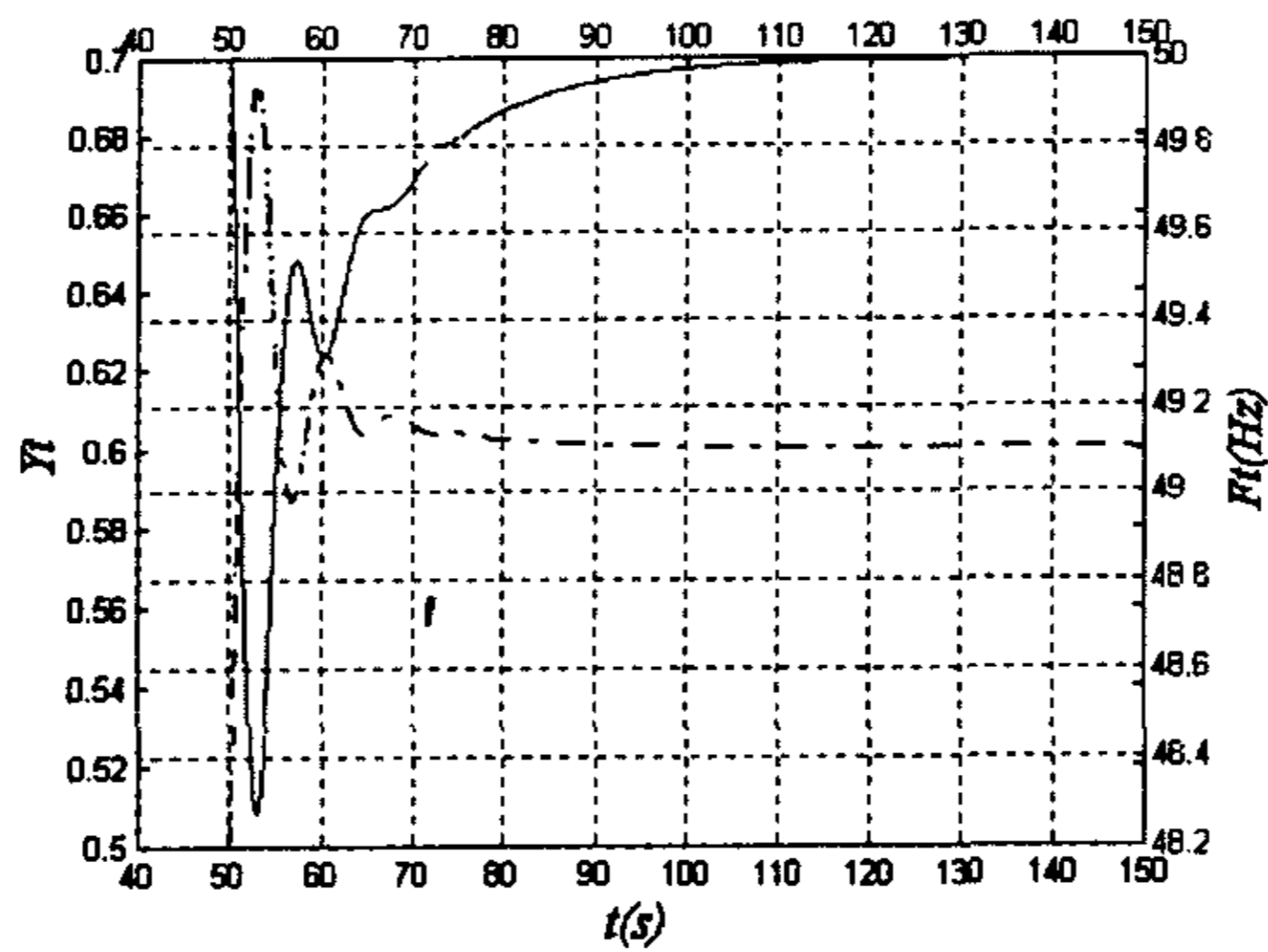
图序	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_p(\%)$	$T_s(s)$
图 3-14 (a)	1.5	0.3	1.7	-5.3	79.9
图 3-14 (b)	3.5	同上	同上	-3.5	12.3
图 3-14 (c)	5.0	同上	同上	-3.5	12.7



(a)



(b)



(c)

图 3-14 不同  $K_p$  时孤网负荷扰动曲线

下面考虑孤网所带负载的特性对系统动态性能的影响。 $e_b$  是负载自调节系数，反映负载的自平衡能力。表 3-2 仿真结果表明：负荷性质不同，调节品质不同，负荷自调节系数越大，调节品质越好，特别是有助于减少超调量。这是合理的，因为负荷自平衡能力强，显然有助于系统稳定。因此，控制参数应根据孤网负荷性质调整。

电网中旋转机械较多，它们的转动惯量对系统稳定性会产生影响。 $T_b$  反映了负载惯性的大小。表 3-3 仿真结果表明： $T_b$  增加，有助于减小  $M_p$ ，即：负载惯性有助于减小  $M_p$ ，这与理论分析一致。

表 3-2  $e_b$  对孤网动态性能的影响

$e_b$	$M_p(\%)$	$T_s(s)$
-1	-4.1	13.7
0	-3.0	14.2
+1	-2.4	14.4

表 3-3  $T_b$  对孤网动态性能的影响

$T_a + T_b$	$M_p(\%)$	$T_s(s)$
10	-4.1	13.7
8	-4.6	11.8
5	-8.5	6.25

## 3.5 小结

本章首先分析了传统建模与仿真方法的特点，考虑到抽水蓄能机组调节系统个性强、难以统一建模，提出分布式、面向环节的、可视化抽水蓄能机组调节系统建模与仿真方法。在风靡全球的 MATLAB with SIMULINK 平台上进行二次开发，建立了抽水蓄能机组调节系统开放式可视化模型库和图形用户接口，每个环节具有 1~5 个模型，对外具有统一接口，用户不必考虑它们与其它环节的兼容性，借助于鼠标便可完成系统组态，其仿真结果以动态曲线和性能指标两种形式呈现，便于定量分析、比较。最后在该仿真平台上研究了水轮机调节系统在孤网运行中的稳定性。

## 4 基于 ICMMS 的抽水蓄能机组 调节系统

**摘要:** 基于 ICMMS 思想提出了新型抽水蓄能机组调节系统硬件、软件体系结构, 实现系统的控制、维护和技术管理。其故障诊断和性能降低单元可进行故障的类别确定、定位、趋势分析, 不仅使调节系统本身运行可靠, 而且还向电厂预知维护子系统实时地提供状态、态势信息, 便于故障处理, 简化了电厂维护子系统设计。传感器冗余设计进一步提高了系统可靠性。开发了嵌入式仿真模块和水泵优化控制, 设计了菜单式中文彩色图形接口。最后提出了一种用于抽水蓄能机组调节系统和常规机组调节系统的预知维护系统, 介绍了其体系结构和功能模型。

抽水蓄能机组调节系统实现水泵、水轮机的调节与控制以及多种工况的转换。抽水蓄能机组的控制与运行与常规机组的差别较大, 工况转换复杂; 而且由于它在电力系统中所处的重要地位, 因此要求它的工况转换时间尽可能短。尤其是可逆式机组的水泵起动过程相当复杂, 不同的起动方式, 其起动程序大不一样。常见的水泵起动方法有: 全压异步起动, 降压异步起动, 背靠背同步起动, 半同步起动, 同轴小电机起动, 变频器同步起动。因此, 用于抽水蓄能机组的调速器(即: 抽水蓄能机组调节系统)比用于常规电站的调速器要复杂得多, 因而对抽水蓄能机组调速器的可靠性提出了更高要求。如何确保调速器优质、高效、“健康”地运行显得尤为重要和迫切, 也就是应解决好优化、维护和可靠性问题。

### 4.1 抽水蓄能电站控制的特殊性

抽水蓄能电站绝大多数按可逆式设计, 水轮机/发电机运行时是一个方向, 电动机/水泵运行是另一个方向, 这就决定了抽水蓄能电站的控制比常规电站复杂得多; 另一方面, 抽水蓄能电站在电力系统中承担调频、调峰、事故备用等任务, 是电力系统安全、稳定、可靠的关键, 故对其可靠性要求高。与常规水电机组相比, 抽水蓄能机组具有如下特点<sup>[8, 16-23]</sup>:

## (1) 运行工况多, 工况变换复杂

常规水轮发电机组的运行工况有静止、发电和调相 3 种, 相应的工况转换有 6 种。而抽水蓄能机组的工况除常规机组的 3 种工况外, 还有抽水和抽水调相共 5 种工况 (有些机组还有变速抽水、黑起动等工况)。理论上工况转换有 20 种, 常用的有发电、发电调相、水泵、水泵调相、静止等 13 种工况转换 (图 4-1)。从抽水工况到发电工况的转换是抽水蓄能电站最具特色的部分, 很有实际意义, 用于电力系统紧急情况。即在抽水蓄能机组处于抽水工况时, 恰逢电力系统因故障出现功率缺额时, 抽水蓄能机组迅速从满载抽水直接转换为满载发电, 为电力系统提供相当于该电站容量 2 倍的出力。这种从满载抽水到满载发电, 因不经过停机过程非常迅速。以反应迅速著称的英国 Dinorwig 抽水蓄能电站为例, 装机  $6 \times 30\text{MW}$ , 机组从满载抽水到满载发电只需 90 秒, 若按正常方式经过停机过程, 则需 8 分钟。若是火电机组, 则需 30 分钟。

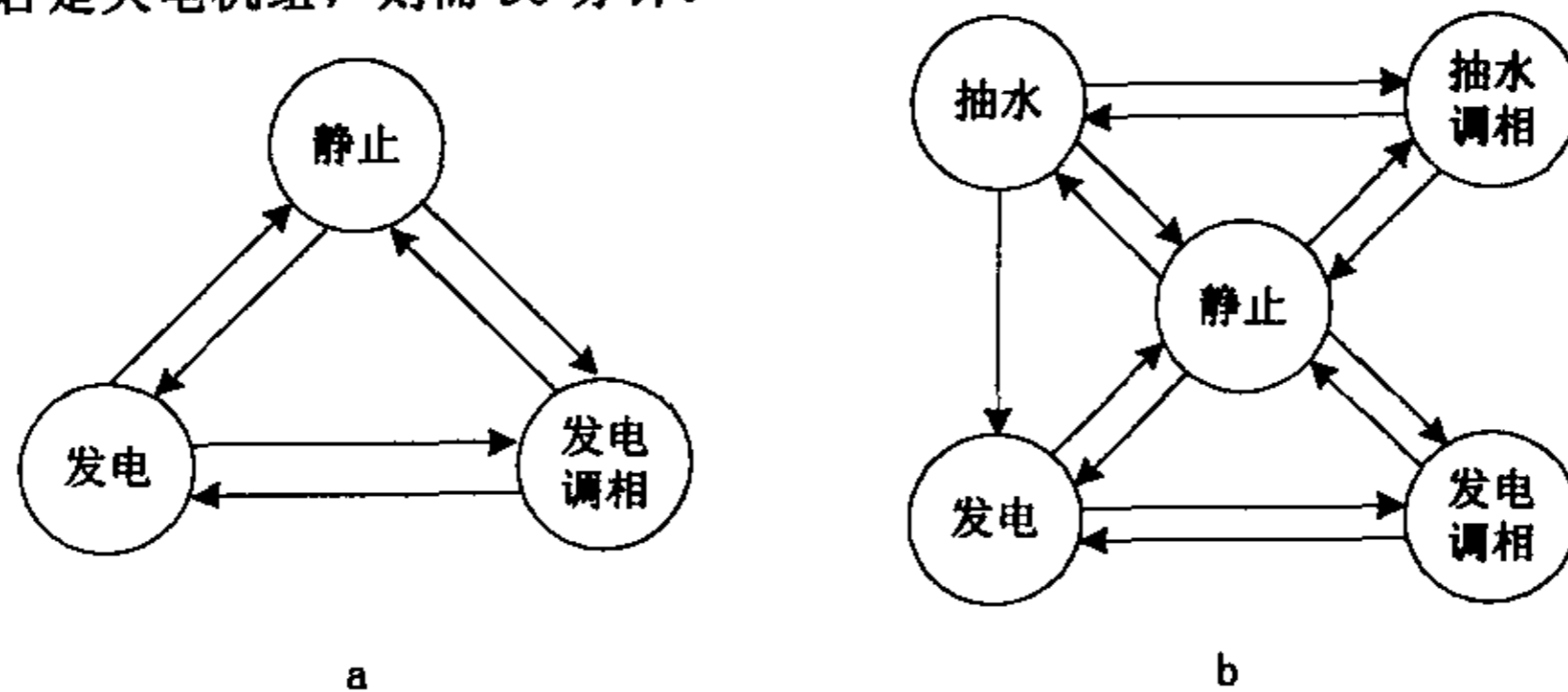


图 4-1 常规机组 (a) 和抽水蓄能机组 (b) 的运行工况及转换

## (2) 控制内容多、控制方式复杂

由于有发电和抽水 2 种截然不同的工况, 控制逻辑非常复杂。即使是与常规机组相同的发电工况, 由于抽水蓄能机组的特殊性, 其调节控制方式也复杂得多。水泵工况的起动更是如此。现代大型可逆式水泵-水轮机组, 广泛采用可控硅变频起动, 并且往往以背靠背起动作为备用。由于有许多重要切换操作和被控的主、辅设备, 而且各种控制都要有周密的闭锁、最优的操作路径和最短的操作时间, 增加了控制的复杂性。

## (3) 操作频繁

抽水蓄能机组承担削峰填谷任务, 还可能参与系统调频, 因此, 机组的运行方式由电力系统负荷图确定。负荷图的峰谷起伏越大, 机组工况转换越频繁。抽水蓄能机组工况一般每天转换 6 次以上。例如: 英国 Dinorwig 抽水蓄能机组按年平均工况转换 15000 次设计, 即平均一天操作 40 次。

## (4) 监视量多

由于运行方式多，抽水蓄能电站的被控量多，监视量也必然多。模拟量测点增加 50%，开关量测点增加 100%以上。

## (5) 可靠性要求高

抽水蓄能机组起停频繁，在电力系统中地位重要，同时需要遥控，以满足无人值班的要求。抽水蓄能机组应对系统的要求作出迅速而有效的反应，所有这些对控制装置的可靠性和可维护性提出了更高的要求。

## 4.2 抽水蓄能机组调节系统特点

抽水蓄能机组调节系统如图 4-2 所示，和其它控制系统相比较，具有如下特点<sup>[8, 23, 25]</sup>：

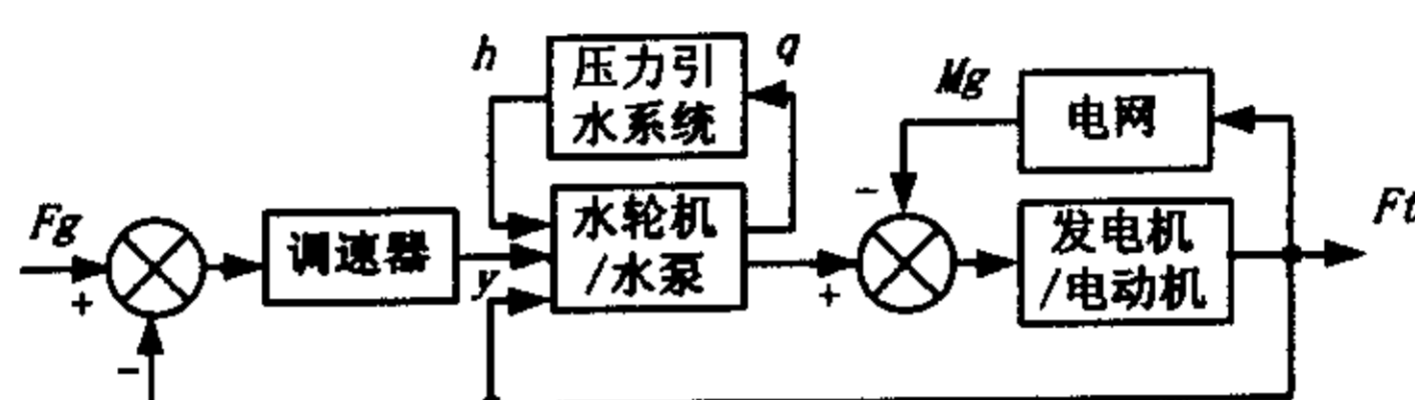


图 4-2 抽水蓄能机组调节系统

### (1) 非最小相位

水电站都是依当地的地质、地貌及其它自然条件开发，以降低开发成本。这样，通常需用较长的压力引水管道将水引入水轮机（水泵工况时流向相反）。导水机构在改变导叶开度时会在管道中产生水锤效应，从而恶化调节性能。从控制理论角度看，它是一非最小相位环节，特别对起动、甩负荷等过渡过程性能有较大的不利影响。

### (2) 双重调节

有些抽水蓄能机组的水泵-水轮机为轴流转浆式，有导水机构和活动浆叶，调速器中须相应地增加一套控制及执行机构，增加了调速器的复杂性；另一方面，浆叶的调整比导叶慢，增加了水轮机出力的滞后，影响调节效果。

### (3) 多级液压放大

调速器根据操作人员的命令和采集到的电网实时频率，按设计的控制规律产生导叶控制信号，改变机组流量，从而调整出力。由于导水机构较大，需要较大的作用力才能推动，故调速器需要设置多级液压放大元件。液压元件的非线性和时滞可能恶化调节品质。

## (4) 个性强, 难建立统一模型

水电站通常根据当地的具体地理条件建设, 以节省投资。从而造成每个水电站各不相同。因此, 很难建立统一的数学模型。加上抽水蓄能机组调节系统是一个快时变系统, 难以经济有效地辨识其参数。这增加了调速器控制算法的复杂性和参数整定的困难。

## (5) 工况转换多, 控制复杂

与常规水轮机调节系统相比, 抽水蓄能机组调节系统涉及到 10 多种工况的转换, 有水泵起动、水泵运行和水轮机运行等复杂的控制。

## 4.3 基于 ICMMS 的抽水蓄能调节系统体系结构

水电厂设备维修根据预先安排的时间表进行, 即计划维护。根据经验所确定的维护计划, 防止了故障隐患的发生, 保证了设备的正常运行。传统观念认为: 对任何设备(或产品)来说, 分解、维护、翻修次数越多, 设备故障率越低。换言之, 对任何设备, 只要预防性维护(Preventive Maintenance)工作安排得越多、间隔越短, 设备的可靠性就越高。然而, 长期研究表明: 在设备的一定使用时间内, 缩短其维护间隔, 并不能防止故障的发生, 也不会减少故障发生的次数。对于随机型故障, 在无先兆的情况下无论进行多少次维护也防止不了故障的发生。事实上采用定期维护具有盲目性, 有些设备在按计划定期进行维护时完全正常, 也无任何“带病”迹象。此类维护不仅浪费了人力、物力、财力, 而且还因在维护过程中不正确的分解、再装配导致设备损伤, 既缩短了其使用寿命, 增加了其后发生故障的机率, 也浪费了人力、物力。问题的关键是: 如何根据设备固有可靠性和当前状态和趋势分析, 作出适时、经济、有效的预防性维护决策。因此, 各电厂都在考虑将原来的计划维修改为状态检修, 或预知维护。这样可以显著增加系统可用度(availability)、大大减少维护费用。但是, 能够进行预知维护的前提是: 能实时地获得厂内各设备的相关动态信息及其趋势报告。智能控制-维护-技术管理系统(ICMMS)能够满足这些要求, 它通过控制改善系统的性能, 实现安全生产; 通过维护提高系统的可用度, 延长系统的使用寿命; 通过技术管理实现控制与维护系统的优化与运行。将控制、维护和技术管理集成在一个统一的自动化系统中, 充分发挥三者的总体优势, 使整个系统获得高性能、高可靠性和高效益。通常老电厂已有控制子系统、管理子系统, 设计、安装全新的 ICMMS 投资大、涉及面广。现实的做法是: 充分利用现有资源, 在已有设备基础上开展预知维护。为此, 本文提出基于 ICMMS 思想设计新型抽水蓄能机组调节系统, 由转速调节与控制子系统、维护子系统和技术管理子系统构成。其故障诊断单元可进行故障类别确定、故障定位、故障趋势分析, 并确定其首发时间。同时自动进行及时处理, 不太严重的故障则显示出来, 让运行人员作出决策。这不仅使调速器本身运行可靠, 而且还向电厂的预知维护子系统或状态检修系统实时地提供本设备的状态及维护信息, 从而可简化电厂维护子系统的设计。



## 4.3.1 ICMMS 工作原理<sup>[82-122]</sup>

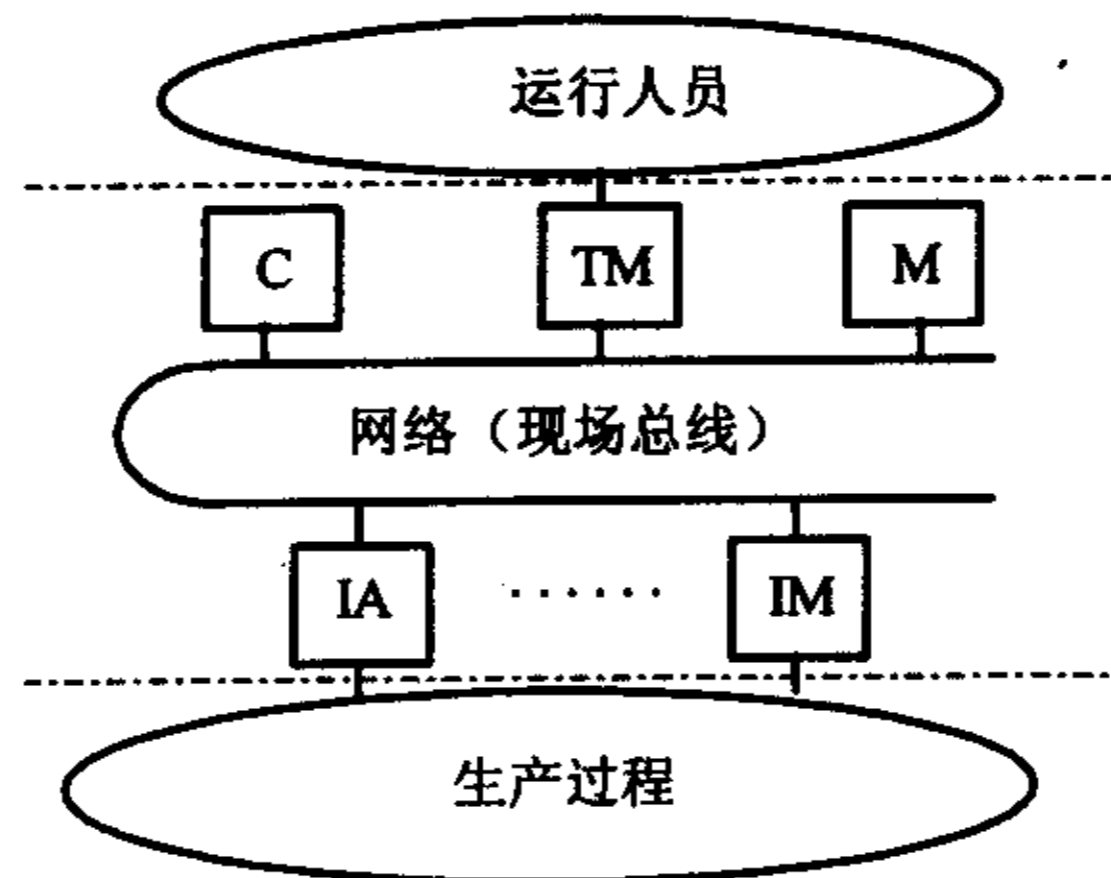
企业以经济、优质、安全地生产产品为目标。其主要技术领域可归结为控制、维护、技术管理三个方面。按传统模式，企业通过控制获取生产过程的高性能和产品的高质量，通过维护获取设备与系统的高可靠性及高利用率，通过管理获取企业的高效益（经济效益及社会效益）。三个方面既相互联系又相互制约。

但是，国内外企业均在不同程度上存在着如下两个问题：

(1) 从自动化与信息化的角度来看，控制、维护、管理三个领域发展不平衡。众所周知，控制领域的自动化与信息化的发展相对最早。国外自 60 年代末、我国自 80 年代以来，开发应用了许多计算机监控系统（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）。管理领域的自动化与信息化比控制领域相对较晚，国外自 80 年代中期、我国则是自 90 年代以来，开始研究办公自动化（Office Automation, OA），管理信息系统（Management Information System, MIS）。而现有的管理自动化系统中大多只是财务管理、人事管理、物料管理等，很少涉及技术管理。相对落后的是维护领域，目前仅停留在计划维护和事后维护阶段，也即只处于手工化阶段。只是在 90 年代中期以来，国外才开始研究状态维护、预知维护、远程维护等技术，而在我国，则刚刚起步。

(2) 控制、维护、管理三个领域互为孤岛，即组织结构上三者分属三个不同的部门；信息方面互不交流或很少交流；决策方面互不联系。实际上，各个领域的决策均有赖于其它两个领域的状况及信息。显然，三个领域相互分离是不合理的。

发展趋势正是沿着为解决上述两个问题的方向而发展：一方面，将控制、维护、管理三个领域提高到同一智能化、信息化、自动化的水平；另一方面，将三者集成为一个统一的系统，从而获取企业整体的高性能、高利用率、高效益。



C-控制（Control）；M-维护（Maintenance）；TM-技术管理（Technical Management）；IA-智能执行器（Intelligent Actuator），IM-智能测量装置（Intelligent Measurement）

图 4-3 ICMMS 系统的总体体系结构

智能控制-维护-管理系统 (Intelligent Control-Maintenance-Management System, ICMMS), 正是这样一个集成的信息体系结构, 旨在通过信息的集成和智能的分布以及一致的实时信息, 产生高性能、高效益和高可靠性, 实现系统整体最优。其基本框架如图 4-3 所示。

ICMMS 系统的基层, 是与生产过程直接相连接的一系列智能传感器 (IS) 或智能检测装置 (IM) 及智能执行器 (IA)。它们均具有智能性。IS (或 IM) 用来检测生产过程的态势与状态 (含故障状态), IA 则用来直接操纵生产过程的各种行为。

智能检测装置及智能执行器均挂于现场总线上。此外, 控制 (C)、维护 (M)、技术管理 (TM) 诸模块也挂于现场总线上。这是一个基于计算机的网络系统。这儿主要是数据流。

ICMMS 系统的上部乃是与运行管理人员相连的用户友好的人机界面。这一部分主要是信息流。

控制、维护、管理可视作三个技术领域或三项大功能, 它们又可含多层次的子功能。通常, 功能 (含子功能) 可用图 4-4 表示。

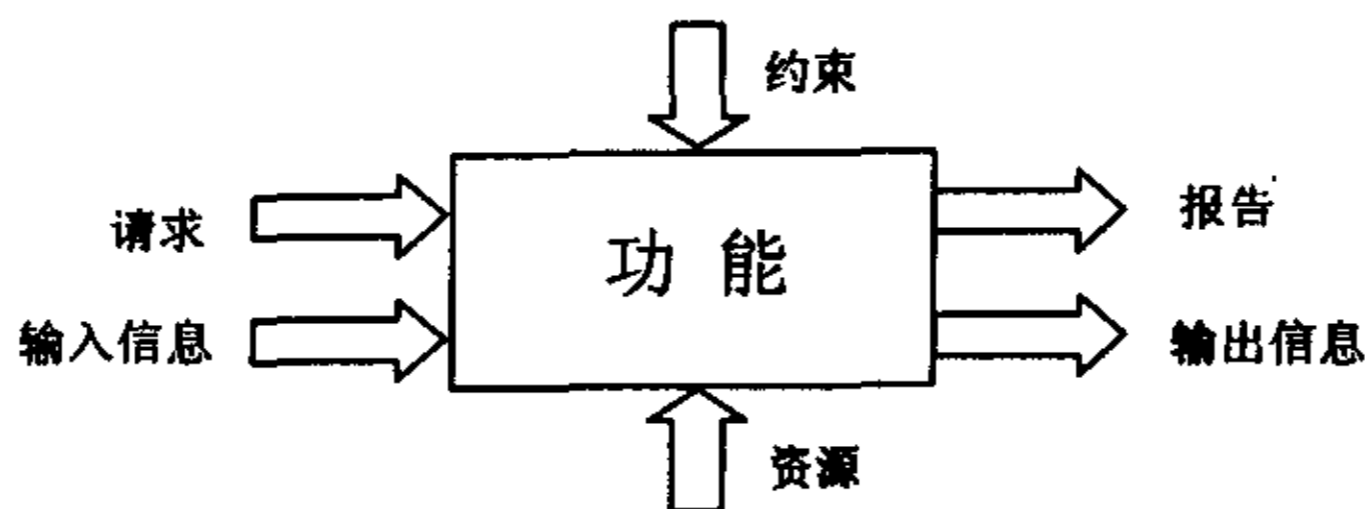


图 4-4 功能单元参考模型

任一功能 (或子功能) 均需满足一定的需要 (needs), 这种需要可直接来自运行人员, 也可来自系统中上级或相邻模块。一般说来, 功能还需向运行人员、上级或相邻模块提供相应的报告, 含状态和态势的历史、当前和预测信息。尤其是, 如某功能模块不能完全执行 (或拒绝执行、或有条件地执行) 上级的要求时, 在给上级的报告中, 应包含其理由的说明。在图 4-4 中, 除标明其需求和报告的信息外, 还要标明其来处和去向。此外, 为完成任一功能 (或子功能) 必须要有相应的输入数据, 一般它们也需向有关模块输出数据。同样这些数据也有其相应的来处和去向。这样, 整个系统就构成了一个完整、有序的数据流。

## 4.3.2 ICMMS 对现场设备的要求

在 ICMMS 中, 控制、维护、技术管理 3 个岛集成为有机整体, 以获得系统的高性能、高可靠性和高经济效益; 各个互连设备之间交换、共享信息, 这就对现场设备和通信提出

了很高的要求。通信协议至关重要，它可能成为系统性能的瓶颈。另一方面，为了减少传送量，各个互连设备之间应该交换信息而不是数据，这与传统的通信方式不同。这意味着现场设备必须是智能的，它应能智能地处理采集到的数据，然后加工成“信息”送到控制站、维护站、技术管理站；同时，它应能智能地处理“上级”的命令，而不是简单地执行。而常规现场设备向控制、维护和技术管理系统分别传送与过程有关的原始信号（如通过常用的 4~20mA 信号），那么各系统在信号变换和解释上可能存在差异，因而带来数据一致性和唯一性问题。因此，在 ICMMS 体系下，希望各现场设备具有智能性。

### 4.3.3 抽水蓄能机组调节系统体系结构

根据 CMMS 思想设计抽水蓄能机组调节系统（以下简称抽水蓄能调速器，若不致于混淆或论述也适合用于常规机组的水轮机调速器，则统称调速器）时，关键是将其放在整个 ICMMS 框架下从整体出发进行硬件和软件的结构设计。抽水蓄能调速器是一个智能装置，既进行智能测量（IM），同时也是一个智能执行器（IA）。抽水蓄能调速器硬件平台的选择相当重要，主要应考虑系统性能、可靠性、编程语言、运算速度、存储器和通信接口等因素。

为了与维护子系统（M）和技术管理子系统（TM）实时交换信息，本设备通过现场总线与上级和其它设备相连。考虑到目前绝大多数电厂的实际情况，暂使用 RS-485 协议。若须某种现场总线，只须更换通信模板即可。这样，抽水蓄能调速器通过请求—报告（Request-Report）形式执行上级命令，报告本设备实时状态、态势及预测等信息，以便维护子系统、技术管理子系统对本设备进行维护决策或相应管理。

另一方面，由于抽水蓄能电站在电力系统中通常担任调频、调峰任务，在一日内频繁地启动、停机，其高可靠性设计应引起足够重视。合理的硬件设计是提高可靠性的重要措施之一。通常微机调速器采用双机互为热备用模式，微机部分是双份，而传感器及外围电路则公用一套，较之单机模式提高了可靠性。但是，随着微电子技术的飞速发展，微机本身的可靠性已大大提高。工业现场运行也表明：调速器的大部分故障不是来自计算机，而是由传感器等外围设备引起的。因此，为了进一步提高抽水蓄能调速器的可靠性，发展了传统的双微机调速器设计方法，本文对关键信息也进行冗余设计。众所周知，机组频率和导叶开度是调速器至关重要的输入信号。本研究在冗余设计时，引入两路机组频率信号，分别取自不同的信号源；引入的两路导叶开度信号也来自不同的传感器。

双机系统的信息交换采用 ARCNET 进行通信，而不用传统的并行口、串行口通信模式。不仅硬件简单，而且大大提高了通信速度（见图 4-5）。

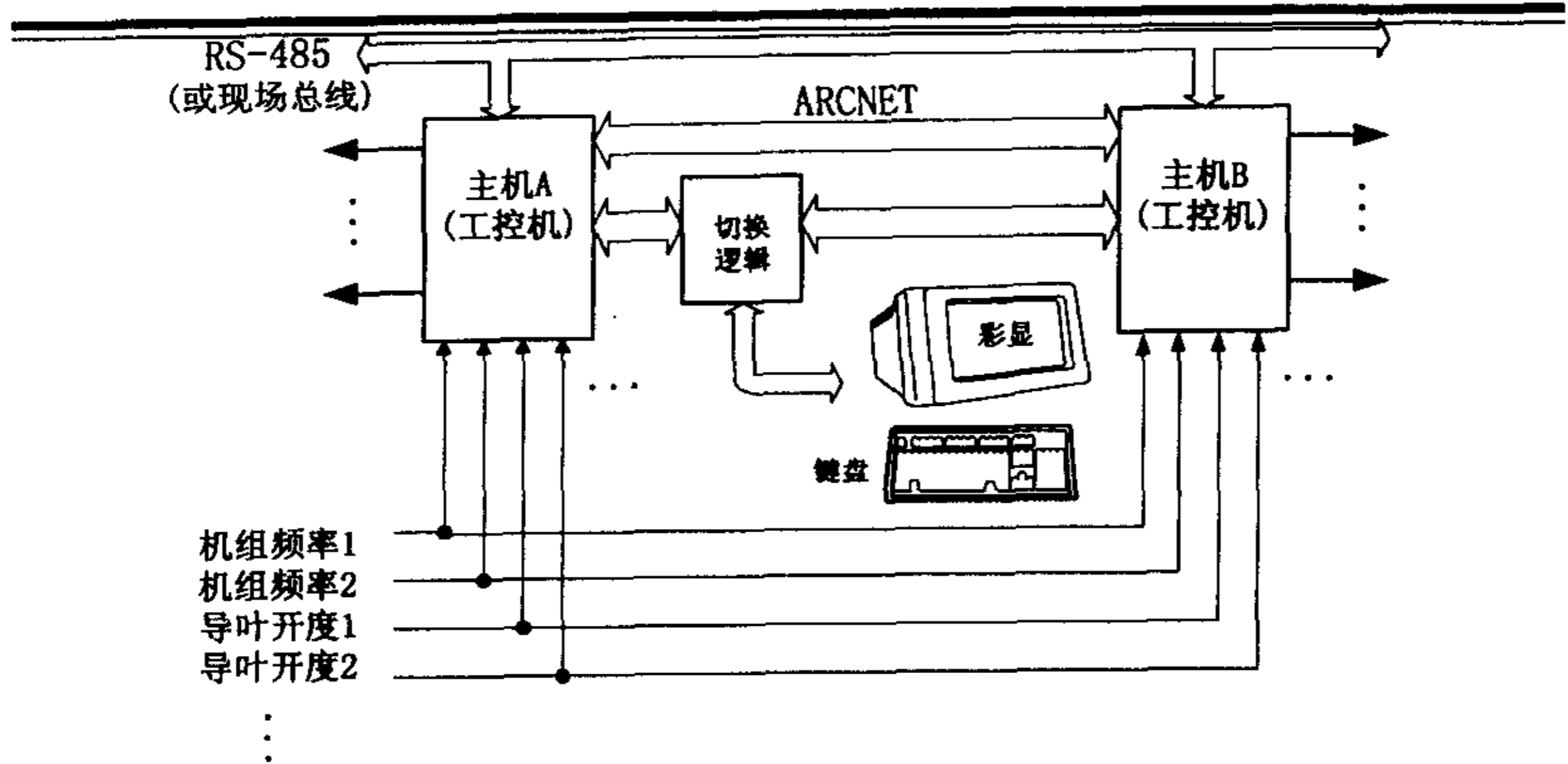


图 4-5 对传感器冗余的 ICMMS 双微机抽水蓄能调速器硬件框图

抽水蓄能调速器由 3 部分组成：调节与控制子系统（即传统调速器部分，完成转速调节与控制任务）、维护子系统（实现根据 ICMMS 要求分布的智能，进行故障诊断、性能降低诊断和预知维护）、技术管理子系统（性能指标测试、计算和评估，控制参数优化）。硬件配置主要考虑前者的要求，选用适用于恶劣环境的工业控制计算机（IPC）构成双机互为热备用的冗余系统（图 4-5）。调节与控制子系统之 A 或 B 机配置一块 All-in-one 486DX/33 CPU 主板，一块 PCL-812 多功能 I/O 接口板（16 路 12 位 A/D、2 路 12 位 D/A、16 路 DI、16 路 DO、一通道计数器），可采集导叶开度、轮叶开度、有功功率、水头等模拟量信号，输出两路模拟量控制信号；一块 PCL-830 计数器板，测量机组频率、电网频率。还有开入（DI）、开出（DO）、显示卡（VGA）、通信模块，等等。维护子系统和技术管理子系统需要导叶开度、浆叶开度、机组频率、油开关等信号，这些已由上述调节与控制子系统测出，故不必重复采集。测试和实践证明：CPU 完全有余力承担被控对象实时仿真任务，仿真机组频率输出可利用 PCL-830 板中多余的一个通道实现，只需在测频调理板上增加一路频率功率放大输出信号。这样，在不增加抽水蓄能调速器硬软件投资的情况下，大大扩展了其功能和性能。

#### 4.4 抽水蓄能机组调节系统软件体系结构

抽水蓄能调速器软件体系由多个域过程 DP（Domain Process）组成，用面向对象方法在 Borland C++ 平台下开发，整个软件模块如图 4-6，用类（Class）和派生类（Derived Class）实现。用类的概念将方法实现封装起来，保证了软件的可重用性；当改变数据结构和算法

时仅局限于实现这个类的代码区域内，方便了程序的维护；用面向对象的概念，在初始设计阶段注重高层的整体性，改善了程序的可靠性。

技术管理子系统最重要的测试是静态特性和动态特性测试。静态特性试验考察抽水蓄能调速器转速死区的大小、非线性度和永态转差系数的准确性；动态特性试验则检验其调节规律和系统动态性能是否满足要求。本章用类 Wave 实现测试数据的记录、处理和各项性能指标计算。由 Wave 派生的类 ShowWave 实现动态曲线显示，具有 Wave 所有的数据成员与成员函数。由 ShowWave 类则派生出了机组频率摆动测试类 Class FreqFluctuation、PID 控制特性测试类 Class PIDCharacter、阶跃法测死区类 Class SpeedDeadBand、频率扰动测试类 Class FreqDisturb、甩负荷试验类 Class LoadRejection、正交法优化控制参数类 Class OrthOpt 和水泵特性测试类 Class Pump。它们均具有 ShowWave 的所有数据成员与成员函数。

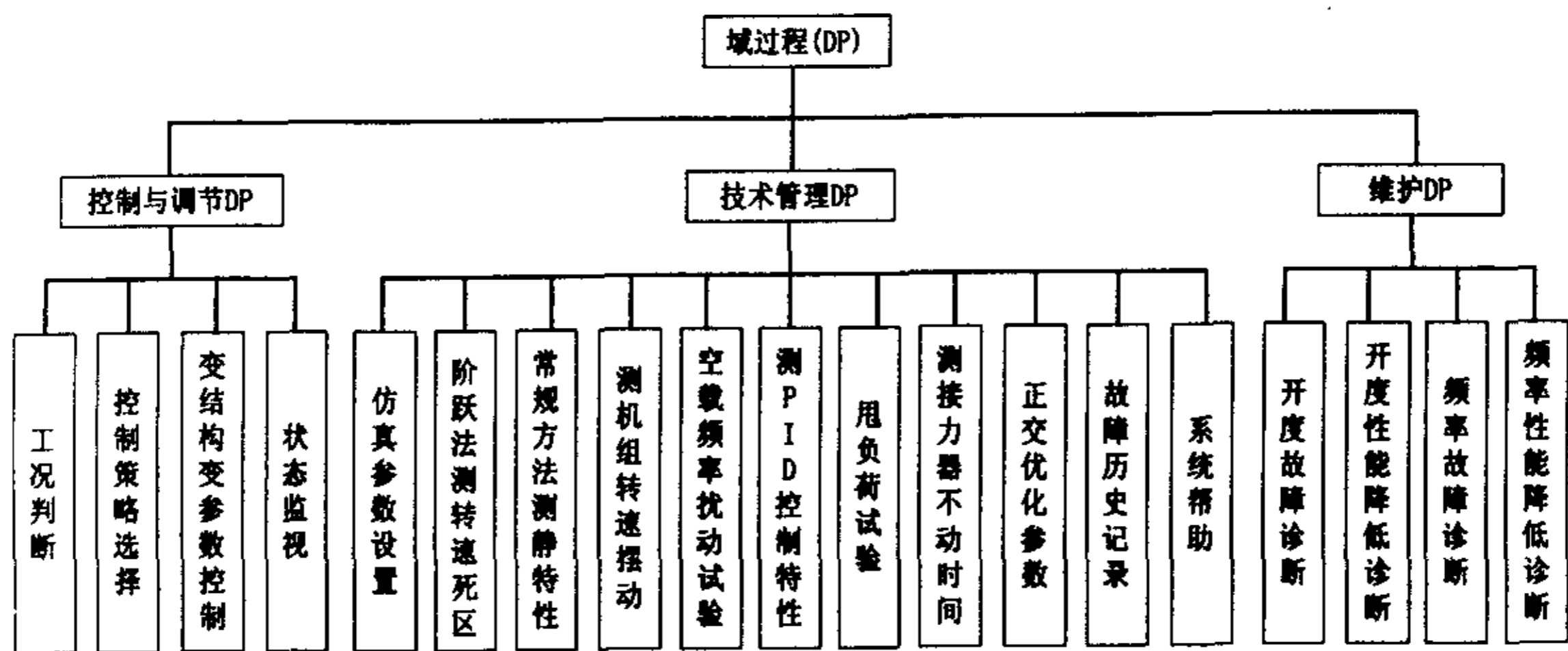


图 4-6 抽水蓄能机组调节系统域过程

试验所需要的各种输入信息、提示、出错等信息均通过对话框函数

Boolean Dialogue (Irect \*rd, DialogCtrl dialog[], char \*title, int AllItem)

实现，对不同试验项目提供不同参数缺省值并进行输入数据合理性检查，以确保输入信息正确。一旦开始试验无须人工干预，由技术管理子系统自动完成。其特点是：测试精度高、速度快、减轻测试人员劳动强度，为抽水蓄能调速器实验室试验、制造厂内调试、电厂检修调试提供了方便。

## 4.5 开度故障诊断和频率性能降低诊断

### 4.5.1 故障诊断和性能降低诊断

任何一个复杂设备或产品,无论多么可靠,总可能发生故障,只不过故障率或高或低、故障或重或轻罢了。因此,有必要检测故障、发现故障、诊断故障和排除/维修故障。这些环节可能是人工的,也可能以自动方式进行。统计表明:在复杂设备的维修过程中,故障的检测与诊断占全部工作的60%~90%。可见研究自动诊断理论与应用对保证设备的可用度至关重要。一般将故障诊断定义为“检测、分离定位、参数识别”所组成的组合<sup>[169]</sup>。检测(Detection)就是对性能/状态进行测试,从而确定是否存在故障。主要应权衡漏报、误报的可能,使风险最小。分离定位(Localization)是指发现故障后,确定出在哪个部位或模块,即故障精确定位。参数识别(Parameter recognition)就是确定故障部件偏离额定值的精确数值。

但是仅仅进行故障诊断是不够的,因为故障诊断是在故障发生后确定故障发生的时间、部位以及原因,一旦诊断到故障,故障业已发生,只能进行事后维护。能够进行预知维护的前提是:可以得到各设备的运行状态信息。只有这样才能作出正确的维护决策。性能降低诊断正是这样一种诊断,在系统仍能维持“正常”工作、只是性能降低时及时发现问题、确定原因,为预知维护提供依据。由于传统的调速器不提供或很少提供本设备的故障诊断信息,维护子系统不得不引入多种信号,在此基础上对调速器进行诊断。这既增加了成本,又因重复引入信号降低了系统的可靠性,此外还须解决信息一致性问题。本文的抽水蓄能调速器按ICMMS思想设计,实时地向电站维护子系统提供本设备的实时状态信息,以便对故障和性能降低进行智能诊断、分析,对未来趋势进行状态演绎。

### 4.5.2 开度故障诊断

故障和性能降低诊断模块(fault and degradation diagnosis)根据实时测得的频率、导叶开度及其它变量,对调速器本身以及导叶传感器、频率信号线、功率传感器等外围设备进行故障识别(fault recognition),若有故障则进行故障定位(fault localization),并确定其原因(cause identification),分析其后果(Effect Analysis)。还可对趋势进行分析、预测。一旦发现故障或故障趋势,则依严重情况分别提示故障、报警、放弃主控权或自动地切为手动。通过故障检索,可获得详细的信息,包括故障类别、首发时间及发生故障的模块名。同时所有这些信息都通过通信网络送到维护子系统。

故障诊断的关键之一是决策阈值的选择<sup>[86, 87]</sup>。本文用代价函数法<sup>[87]</sup>确定开度传感器故障的决策阈值。其基本思想是选取最优阈值使虚警率和漏报率都很小。产生诊断错误的原

因是：在提取故障特征的数据中可能混有“噪声”或“干扰”。首先考虑虚警率：设被比较的两个开度冗余信号分别为  $y_1$ 、 $y_2$ ，假定两者具有相同的统计特性，均服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma^2$  的正态分布，其概率分布密度为

$$f_1(y) = f_2(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4-1)$$

式中，均值  $\mu$  代表真实信号幅值， $\sigma^2$  则由各种噪声引起。

令  $z=|y_1-y_2|$ ，则由式 (4-1) 得  $z$  的概率分布密度函数为

$$f(z) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{z^2}{4\sigma^2}}, & z > 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}$$

取阈值为  $Y_c$ ，则虚警率为

$$P_{FA}(Y_c) = \int_{Y_c}^{\infty} f(z) dz = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{\frac{Y_c}{\sqrt{2}\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (4-2)$$

确定漏检率  $P_M$  时，假设故障为偏置型且幅值为  $B$ 。若  $y_1$  和  $y_2$  中有一个信号出现偏置量为  $B$  的故障，则相应的  $z=|y_1-y_2|$  的概率分布密度函数为

$$f_z(z|B) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \left[ e^{-\frac{(z-B)^2}{4\sigma^2}} + e^{-\frac{(z+B)^2}{4\sigma^2}} \right], & z > 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}$$

取阈值为  $Y_c$ ，则漏检率为

$$P_{MB}(Y_c) = \int_0^{Y_c} f_z(z|B) dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{-Y_c-B}{\sqrt{2}\sigma}}^{\frac{Y_c-B}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

设  $B$  在  $[-H, H]$  上均匀分布，则总的漏检率为

$$P_M(Y_c) = \frac{1}{2H\sqrt{2\pi}} \int_{-H}^H \int_{\frac{-Y_c-B}{\sqrt{2}\sigma}}^{\frac{Y_c-B}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du dB \quad (4-3)$$

设被监控信号开度  $y$  的故障概率为  $P_f$ ，构造如下目标函数

$$c(Y_c) = P_f P_M(Y_c) + (1 - P_f) P_{FA}(Y_c) \Rightarrow \min \quad (4-4)$$

根据式 (4-2) ~ 式 (4-4) 所确定的  $Y_c$  就是开度最优阈值  $Y_{co}$ 。

### 4.5.3 性能降低监视

下面以频率测量为例讨论性能降低监视的原理。设在任意时刻  $k$  测得的机组频率为  $f(1,k)$ 、 $f(2,k)$ ，测得的电网频率为  $f(3,k)$ 。当机组并入电网时，机组频率就是电网频率，即：

$$f(1,k) = f(2,k) = f(3,k)$$

考虑到测量方法和精度的差异，它们不可能精确相等。但其偏差有一个合理范围：

$$|f(i,k) - f(j,k)| < \mu, \quad i \neq j, \quad i,j=1,2,3 \quad (4-5)$$

这里可根据所要求的测量精度、测量模块的性能等因素确定  $\mu$ 。若式(4-5)不成立，但式(4-6)成立：

$$\mu \leq |f(i,k) - f(j,k)| < \mu_{max}, \quad i \neq j, \quad i,j=1,2,3 \quad (4-6)$$

可用三选二表决法确定出某模块(含相应的传感器)性能降低，有故障趋势。当然，若出现三者之间的相互偏差均超出预定值，可结合电网频率的合理范围进行深入分析。

## 4.6 频率相位测量新方案

近十年来众多研究人员运用最新 IT 技术研制了各种类型的水轮机调速器，机组频率测量始终是其最关键的部分之一，它往往决定了调速器的成败。最初用单板机、STD 总线构成的水轮机调速器用 8254(或 8253)测频；后来为了提高其可靠性，将可编程控制器(PLC)用于水轮机调速。由于小型 PLC 在测频方面无法满足大型调速器的精度要求，研制了基于单片机的智能测频模块，其特点是精度高、硬件简单。但在我国调速器生产厂家现有条件下，难以持续保证该模块的高可靠性，成为制约 PLC 调速器高品质的瓶颈因素之一。后来出现的工业控制计算机(IPC)以丰富的硬软件资源和高级语言开发手段受到了研究人员的高度重视和广泛使用。IPC 由计算机专业厂家针对恶劣的工业环境设计，并有严格的质量管理体系和完善的检测手段，其可靠性已被工业界认可，基于 IPC 的水轮机调速器应运而生。但在测频方案上，仍采用基于 8254 芯片的模板。一片 8254 有 3 个定时计数器，计数器须两两级联测量一路机组频率，芯片功能不强，用于调速器不够理想。本文提出了一种新的测频方案，选用基于 Am9513A 芯片的 IPC 模板，可对高达 6.8 MHz 的时钟脉冲计数，具有极好的测量精度；一片 Am9513A 有 5 路独立的 16 位定时计数器，可同时测量两路机组频率、一路电网频率、机频网频相位差，还输出一路仿真频率供闭环调试使用。借助其功能强大的片内寄存器，只用一个硬件中断处理 3 路频率测量，并可容易地进行软件抗干扰设计。现场运行证明了其可靠性和实用价值。

### 4.6.1 高性能的 Am9513A 系统定时控制器

Advanced Micro Devices 公司的 Am9513A 系统定时控制器(System Timing Controller)是面向处理器系统的大规模集成电路支持芯片<sup>[170]</sup>，有 5 路独立的 16 位计数器，多个计数器可内部级联使计数长度高达 80 位。可通过程序选择各种内部频率源和各种硬软件门控(GATE)，可用作频率合成、脉宽测量、周期测量、频率移相键控、频率-电压转换、脉冲计数、日月时间的计数、即时报警，等等。具有各种可编程运行模式和控制特性，在程序控制下，可动态重配置 Am9513A。外部电路通过控制口、数据口对其寻址，控制口直接存取状态寄存器、命令寄存器以及更新数据指针寄存器；数据指针寄存器则控制数据口的



寻址，数据口用来与所有其它可寻址的内部单元通信，例如主模式 (Master Mode) 寄存器和计数器模式 (Counter Mode) 寄存器。每个计数器都有一个装入寄存器 (Load Register) 和一个保持寄存器 (Hold Register)，通过数据口存取。前者用来自动将预定值重装到计数器，后者则用来保存计数瞬时值而不会干扰计数过程。必须先向计数器发一个启动命令 (ARM 命令)，此后，通过硬件门控允许或禁止计数。共有 24 种计数器运行模式，模式 E 和 Q 均可用于测量频率。强大的命令结构简化了计数器与用户的接口。

## 4.6.2 用 Am9513A 测量频率和相位

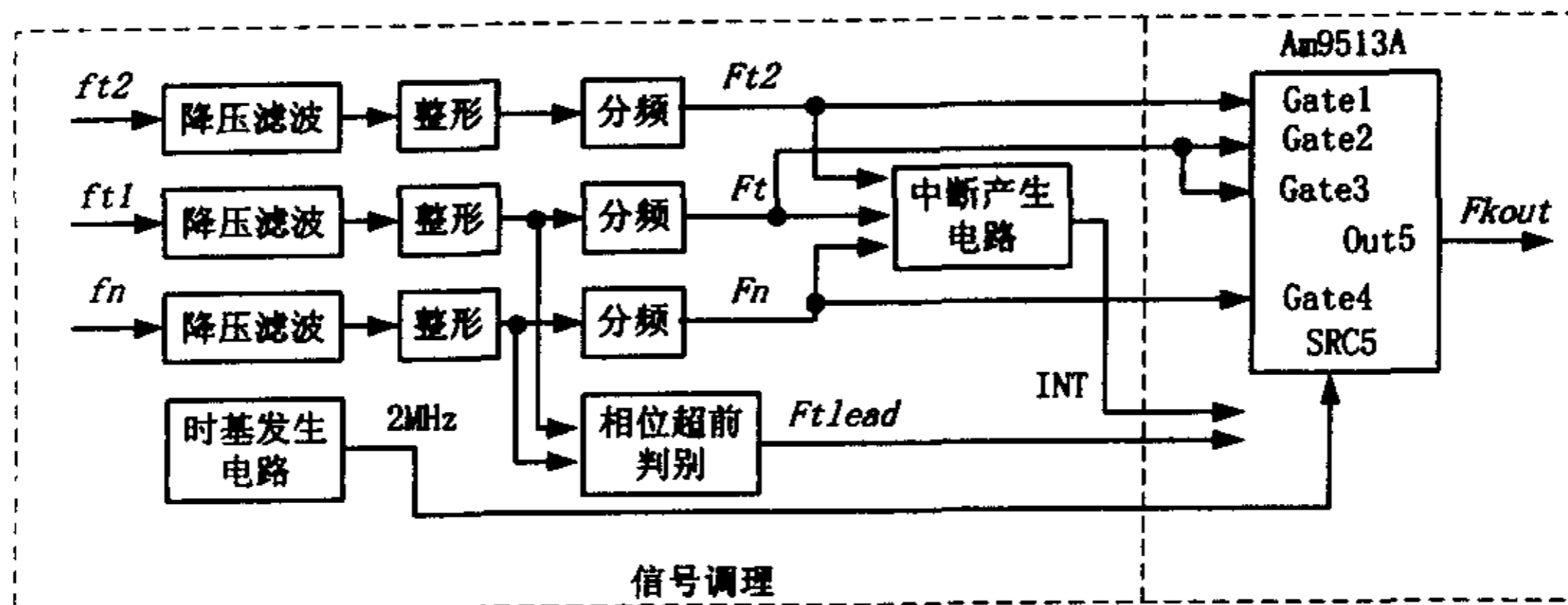


图 4-7 频率相位测量原理框图

频率测量是调速器中最关键的环节，对调速器静态性能和可靠性具有至关重要的影响。因此，研究人员都极为重视。与其它用途的频率测量<sup>[17]</sup>不同，调速器中频率测量要求精度高、时延小、可靠性高。当机组启动时残压较低，现场干扰大，常常导致错误的测量结果。解决办法必须从硬件和软件入手，而不能仅仅依赖于某一方面。通常微机调速器中只测量一路机组频率信号<sup>[55-58, 63-64]</sup>。考虑到机组频率信号的重要性，本文引入两路来自不同信号源的机组频率信号 ( $F_{11}$ ,  $F_{12}$ )，以便进行容错处理、故障分析，提高测频可靠性。一方面，在硬件设计上考虑滤波、抗干扰措施；另一方面，在软件上借助于 Am9513A 强大的功能采取有效的容错、避错手段。

现代调速器均有频率跟踪功能，使机组频率跟踪电网频率。理论和实践都证明，良好的频率跟踪性能并不意味着并网速度快。众所周知，并网的三要素是机组侧与电网侧电压大小相等、相位相同和频率相等。良好的频率跟踪性能只保证了一个要素符合要求，因此，设计相位测量环节，以便调速器进行相位控制，从而加快机组并网速度。本文设计的相位测量电路只须用简单的逻辑门识别出机组频率是否超前于电网频率 (图 4-7)，相位差的大小则用软件计算，省去了通常使用的鉴相器。

为了提高调速器整机的可靠性，将自制硬件减到最少。因此，只自制了市场上无法买到的信号调理电路，将调理后具有 TTL（或 CMOS）电平的所有频率信号和相位超前信号  $F_{thead}$  送到某专业厂家的基于 Am9513A 的 IPC 模板。

## 4.6.3 基于 C++ 的中断程序设计

调速器对动态特性要求高，故频率测量的响应速度要快，实时性强，因此，必须用中断方式。本文须测量 2 路机组频率、一路电网频率，若每一路用一个中断，则须 3 个中断。但 IPC 的硬件中断资源有限，本文将 3 路频率合成为一个硬件中断，至于是哪一路频率引起中断，则由软件借助于 Am9513A 中的寄存器进行判断（图 4-8）。实践证明，该方案是可行的，节约了 IPC 宝贵的中断资源。

用以下中断初始化程序设定各计数器模式。

```
void InitFreqInt(void) /* 中断初始化程序 */
{
    outp(CTRLPORT1, 0x17); /* 数据指针: 写 Master Mode */
    outp(DATAPORT1, 0x00); /* Master Mode 控制字, 先写低字节、后写高字节: 选择总线宽度、频率源及其分频方式 */
    outp(DATAPORT1, 0x91);
    outp(CTRLPORT1, 0x01); /* 数据指针: 从计数器 1 开始 element 循环 */

    outp(DATAPORT1, 0xa9); /* 计数器 1 模式选择字, 先写低字节、后写高字节: 模式 Q、2MHz、计数器源为 src5、二进制计数、低电平门控 */
    outp(DATAPORT1, 0xb5);
    outp(DATAPORT1, 0x01); /* 装入寄存器赋初值 */
    outp(DATAPORT1, 0x00);
    outp(DATAPORT1, 0x01); /* 保持寄存器赋初值 */
    outp(DATAPORT1, 0x00);
    ... (计数器 2-4 的初始化设置: 与上类似)
    outp(CTRLPORT1, 0x5f); /* 将初值装入计数器 1--5 */
    outp(CTRLPORT1, 0x3f); /* Arm 计
```

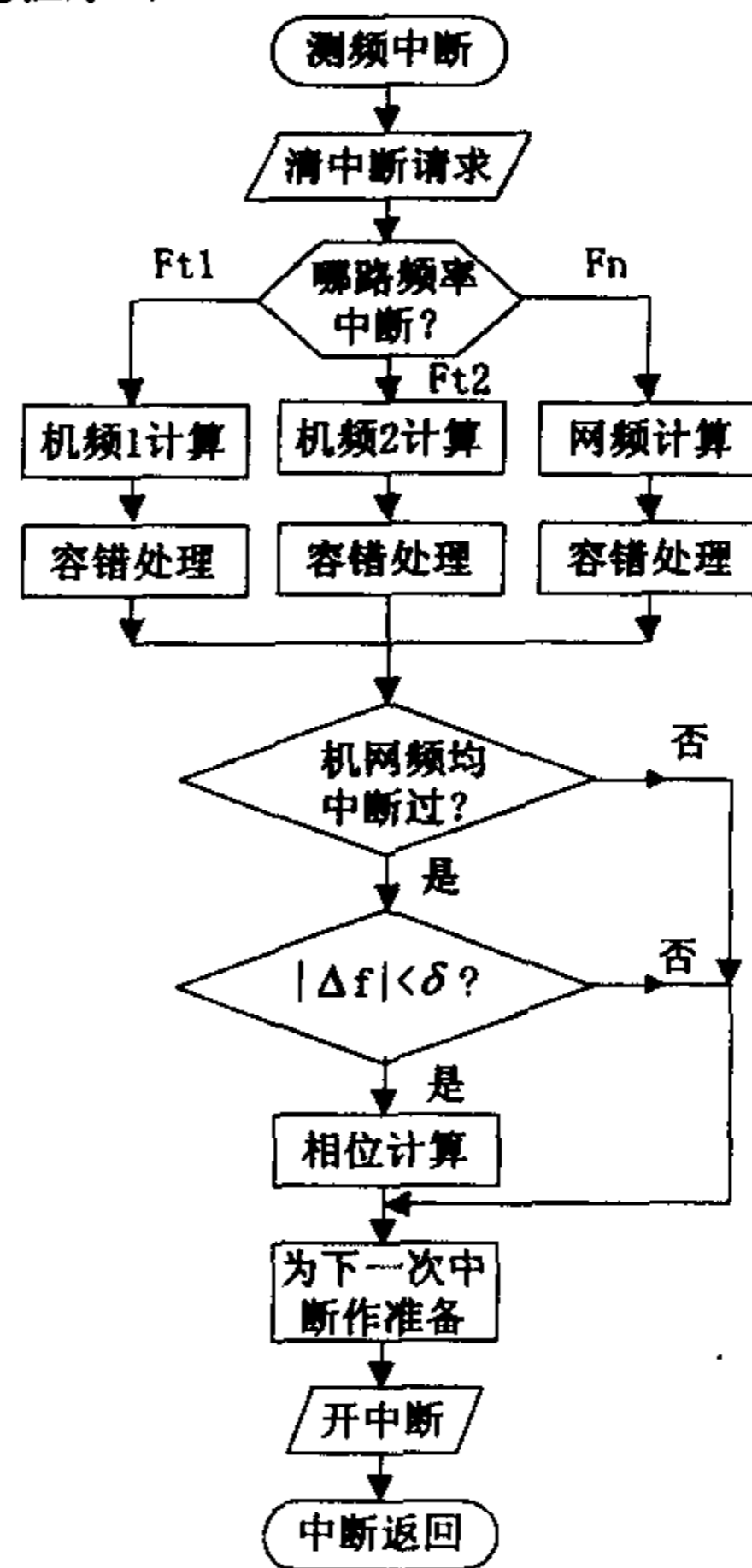


图4-8 测频测相中断程序框图

```

    数器 1--5 */
    enableirqi (5) ;          /* 开中断 */
}

```

当中断初始化后，只要所设定的门控信号电平到来，各计数器便开始计数，一旦任一路计数器结束，便产生中断。在中断服务程序中首先清中断请求，以免在中断处理期间漏掉某一路频率信号的中断。中断服务程序片段如下：

```

void interrupt NewIrq5(_CPPARGS) /* 频率中断程序 */
{udo.bdo.cli0t1=0;      outp(DIOPORT2H,udo.chdo); /* 清中断请求信号
    */
    udo.bdo.cli0t1=1;      outp(DIOPORT2H,udo.chdo);
    outp(CTRLPORT1,0x0af); /* 控制字:保存计数器 1-4 的计数值到保持寄存器 */
    outp(CTRLPORT1,0x19) ; /* 装入数据指针:从计数器 1 开始保持循环 */
    cftur1k_.bci.clsb=inp(DATAPORT1); cftur1k_.bci.cmsb=inp(DATAPORT1);
    //c1 hold
    cftur1_.bci.clsb=inp(DATAPORT1); cftur1_.bci.cmsb=inp(DATAPORT1);
    //c2 hold
    cfnet_.bci.clsb=inp(DATAPORT1); cfnet_.bci.cmsb=inp(DATAPORT1);
    //c3 hold
    cftur2_.bci.clsb=inp(DATAPORT1); cftur2_.bci.cmsb=inp(DATAPORT1);
    //c4 hold
    udich.chdi= inp(DIOPORT2H); /* 读相位超前信号 */
    ..... (计算频率、相位,容错处理)
    asm sti; /* 开中断 */
    outp( 0x20 , 0x20 ) ;
}

```

容易推算，在计数脉冲频率  $f_{src}=2$  MHz 时，额定频率附近的分辨率为 0.0025 %，可见完全符合调速器的测量要求。

## 4.7 嵌入式仿真

随着仿真工具和技术的不完善及仿真应用在深度和广度上的发展，近年来，将仿真工具和技术嵌入到系统中，参与实时调度、监控、辅助决策已成为现实。对嵌入式仿真的首要要求是实时性。这就意味着在控制系统的一个采样周期内既要完成规定的控制任务，又要完成仿真计算。这种实时性要求对构成系统的计算机硬件和软件性能提出了极高要求。受产品性能-价格比的制约，不可一味追求硬件的高性能。仿真算法设计在减少计算时间方面起着相当重要的作用。此外，应适当简化模型，与实时性要求和具体的仿真目的相适应。用 MATLAB with SIMULINK 可以建立复杂的系统模型（象本文第 3 章那样），利用其专

业的仿真算法设计可得到真实可信的仿真结果和数据。但是，抽水蓄能机组调节系统是一个复杂的、强非线性水-机-电联合动态系统，用 MATLAB 仿真无法满足实时性要求，即使采用简化模型也如此。为此，将被控系统嵌入式仿真定位为“定性仿真”，仿真只反映被控对象的内在规律，其目的是用于控制系统的调试、培训和故障诊断辅助。根据第 3 章推导的各环节数学模型，简化的系统模型为：

$$\begin{aligned}
 X &= AX + BU \\
 X &= (x, q)^T, U = (y, m_{g0})^T \\
 A &= \begin{pmatrix} \frac{-(e_g - e_x)e_{qh} - e_{qx}e_h}{(T_a + T_b)e_{qh}} & \frac{e_h}{(T_a + T_b)e_{qh}} \\ \frac{e_{qx}}{T_w e_{qh}} & \frac{-1}{T_w e_{qh}} \end{pmatrix} \\
 B &= \begin{pmatrix} \frac{e_y e_{qh} - e_{qy} e_h}{(T_a + T_b)e_{qh}} & \frac{-1}{T_a + T_b} \\ \frac{e_{gy}}{T_w e_{qh}} & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

式中， $x$  是机组频率； $q$  是机组流量； $y$  是导叶开度； $m_{g0}$  是负载力矩；均为相对偏差值。 $A$  是系统矩阵，由被控对象各环节的参数构成； $B$  是控制矩阵，反映控制量对状态的影响。仿真时考虑  $x$ 、 $q$ 、 $y$ 、 $m_{g0}$  等变量的非线性约束，用对象仿真类 Class Simulate 实现，它包括机械液压系统仿真和被控对象仿真，用改进的四阶 Runge-Kutta 法计算，以确保收敛性和仿真精度。

实践证明，嵌入式仿真类 Class Simulate 使得调速器的闭环调试可以在制造厂或任何地方进行，为调速器在现场顺利投运打下了坚实的基础。同时，也为调速器人员培训和故障诊断提供了方便工具。

## 4.8 水泵工况的优化控制

抽水蓄能电站的特点就是在系统负荷很少的低谷期抽水以储存能量，在用电高峰时则放水发电。随着分时电价体系的建立，抽水蓄能电站的经济效益会更加显著。在抽水工况下经济有效地利用电能将水抽到上库是提高电站经济效益的关键之一。因此水泵优化控制的重要性不言而喻。但抽水蓄能机组特别是可逆式水泵水轮机有其独特之处，只有掌握了其特性才可能对其进行有效控制。

## 4.8.1 可逆式水泵-水轮机控制的特殊性

与常规混流式水轮机比较,在相同水头、转速条件下,可逆式水泵-水轮机的转轮直径较大,是前者的1.3~1.5倍,其特性曲线需用四个象限表示,机组的过渡过程经过宽广的区域。此外,可逆式水泵水轮机因为转轮直径较大,离心力作用大,在高转速区水的进流很快下降,特性曲线明显向下弯曲,形成一个“S”形(参见图3-4)。在“S”区域内机组在同一转速下对应3个不同的单位流量,其中一个还是负值,可见“S”区域是不稳定区,应尽量避免机组运行在该区域,它对机组起动、工况转换、甩负荷等均有较大影响。另一方面,水泵起动方法多,有些还牵涉到作拖动用的水轮-发电机组的配合,控制相当复杂。

## 4.8.2 水泵起动方法

可逆式水泵水轮机不仅因多了水泵运行工况而变得复杂,而且水泵起动方法比水轮机起动方法多得多、也复杂得多。这直接增加了控制的复杂性,由于多种起动方式的切换和闭锁,对控制装置的可靠性提出了更高要求。常用的起动方法有:

### (1) 全压异步起动

利用机组主断路器以全电压方式将机组起动,机组以感应电动机方式升速到额定转速附近,然后加励磁电压,机组被拉入同步。这种起动方式的控制比较简单。

### (2) 降压异步起动

通常通过在电机主回路串联电抗器或利用主变压器抽头来实现。这种控制中的主要问题是从部分电压到全电压的切换,对于前者只须用断路器将降压电抗器短接;对于后者,从部分电压转换到全电压期间,电机有一个断电间隙,而且在全电压与部分电压之间还有相位差问题,须妥善处理。

### (3) 背靠背同步起动

待起动的机组由另一台作驱动用的发电机起动,两机主回路互相连接。起动前两机分别加上一定比例的励磁,应使驱动用发电机的励磁电流大于被起动的电动机的励磁电流,其比值取1.25~1.5比较合适。按一定速度开启发电机的导叶一直到预定开度,抽水机组便与发电机同步升速,当转速达到95%额定转速附近,由同期装置调整发电机的转速和电压,满足同期条件时将抽水机组并入系统。这种方式比较复杂,需要同时控制驱动机组和待启动机组。

## (4) 半同步启动

这种方式与背靠背启动类似,所不同的是抽水机组起初以感应电动机方式启动。先使发电机启动并升速到 50%~80%额定转速,将发电机与抽水机组连接起来,然后投发电机励磁,此时发电机减速、电动机升速,达到平衡时电动机投励磁,接着两机同步升速,其后的过程与“背靠背”完全一样。

## (5) 同轴小电机启动

机组由同轴感应电动机带动升速,当机组在额定转速附近时,由接入转子回路的液体变阻器调整转速,待满足同期条件时,将机组并入系统。

## (6) 变频器同步启动

这种启动方式与背靠背同步启动相似,只是驱动用的发电机改为可控硅变频装置。这种方式对机组没有特殊要求,可靠性高,为新建大型抽水蓄能电站广泛采用。变频器启动方式的另一优点是:变频器可在机组停机时作回授制动,变频器两端的整流桥的工作状态与水泵启动时正相反,连接于机组侧的整流桥工作于整流状态,接于电源侧的整流桥工作于逆变状态,这样可把机组的惯性动能转换为工频电能馈送到系统中,不仅回收了电能,而且使定子流过不大的电流而获得较短的制动时间。

## 4.8.3 水泵优化控制

水泵优化控制一方面应保证各种水泵启动方法的成功,另一方面,使水泵可靠、经济、高效的运行。如上所述,水泵启动方式很多,在启动过程中,除按各自的要求进行控制外,还要避开水泵水轮机泵工况扬程特性曲线的驼峰区,以减小机组噪声和水压振荡。此外,在水泵控制软件设计中使水泵始终运行在最大效率而不论水泵扬程如何变化。换句话说,当扬程变化时,水泵控制软件及时调整导叶开度使水泵工作在最大效率点。对双转速机组,若机组转速变化,则相应调整导叶开度使水泵效率最高。

另一方面,为了充分发挥抽水蓄能电站事故备用的作用,本研究还设计了从水泵工况到水轮机工况的直接转换。当机组处于抽水工况恰逢电网发生事故时,水泵-水轮机可根据命令从满抽转为满发,从而向电力系统提供  $2P_r$  的功率,  $P_r$  是机组额定功率。

## 4.9 全中文、用户友好的交互式人机界面设计

微机调速器通常采用模拟表计和数码管显示。其不足显而易见:首先显示的变量个数有限,其次数码管显示变量时运行人员须记住大量符号,也无法显示动态过程。本研究设计为全中文彩色图形界面,其硬件可选用 TFT LCD 显示器或 CRT 显示器。在图形界面中可显示出系统状态、系统参数、传感器测量值、动态过程、模式配置信息、运行模式、双

机工作情况及故障信息，等等（如图 4-9 所示）。通过监测、参数整定、静态试验、动态试验、故障检索、帮助等主菜单进行相应操作和检索。

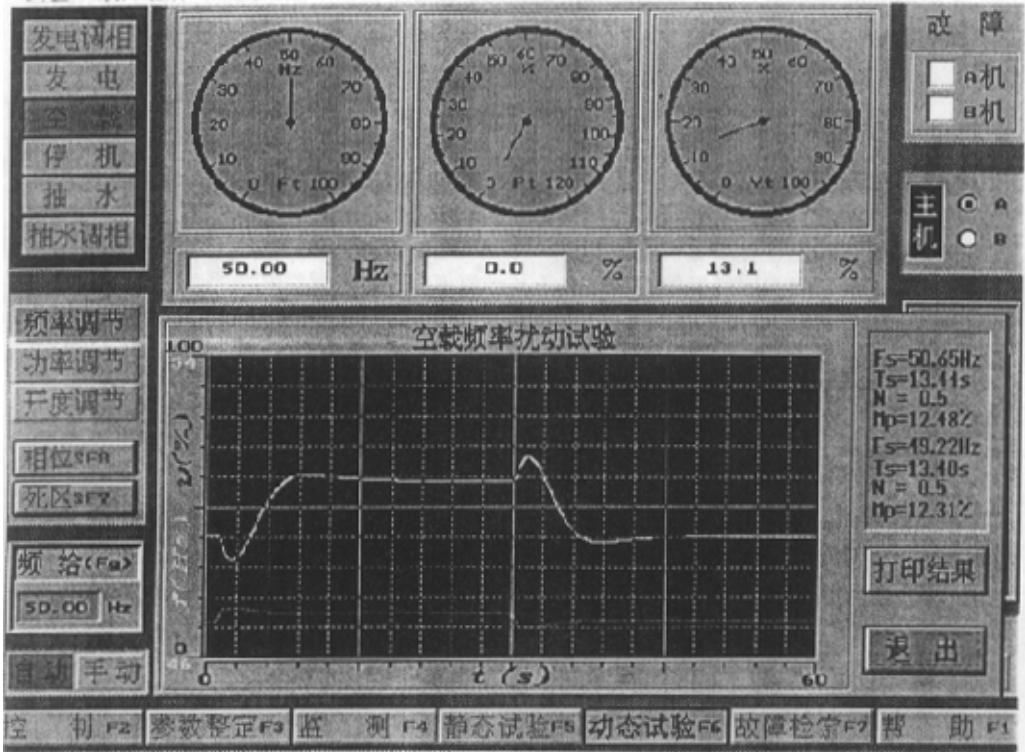


图 4-9 抽水蓄能调速器全中文彩色图形画面之一

## (1) 状态监视

抽水蓄能电站和常规电站不同，它涉及到的工况要多得多，一般有 13 种。如何直观显示工况的变化具有重要实用价值。本文将抽水蓄能机组的停机待命、空载、发电、调相、抽水、抽水调相等“稳态”工况表示在界面的左上角。当机组处于其中之一时则用绿色示之。当发生过渡过程时，例如甩负荷，过渡过程发生前的“发电”稳态仍以绿色表之，而目标状态——“空载”将以绿色闪亮。这样可清楚地表示出机组的过去、现在及将来的状态。

## (2) 动态过程录波

在机组运行、试运行或试验过程中，常常须了解开机过程、空载扰动波形、甩负荷波形，以便整定合适的调节参数。本机自带动态录波功能，并可计算相应的性能指标，免去了外接仪器的麻烦。

## (3) 发电模式设置

当机组并网发电后，本机可工作在频率调节、功率调节和开度调节三种模式。用户可在任何时候（不论开机与否）借助“参数整定”下的“模式设置”子菜单预先设定所需的模式。当实际情况不符合预设模式的运行条件，机器将根据具体情况实时地调整到最合适的模式运行。例如当电网频率的波动超过了某一阈值，意味着机组在小网或孤网运行，则调速器自动转到频率调节模式，以稳定电网频率。当电网频率波动又小于阈值并持续一定时间，则调速器自动无扰地切换到预设模式。

## 4.10 工业现场试验

根据本文部分研究成果所开发的抽水蓄能调速器已转化为工业产品，迄今销售 16 台，总产值 480 万元。2001 年通过了国家经贸委主持的鉴定，达到“国际先进水平”。下面是四川某水电厂进行试验的主要结果。该电站总装机  $4 \times 175000\text{kW}$  混流式机组，设计水头 83m。

### (1) 静特性试验：

实测数据见表 4-1~表 4-2。转速死区  $i_s=0.0059\%$ ，非线性度=0.1%（IEC61362-1998 规定  $i_s \leq 0.04\%$ ）。

表 4-1 导叶开方向实测数据（F—机组频率，Hz；Y—导叶开度，%）

F	51.40	51.18	51.01	50.80	50.60	50.41	50.20	50.01	49.80	49.61	49.40	49.20
Y	4.12	11.65	17.33	24.12	30.92	37.30	44.18	50.75	57.46	64.04	70.77	77.52

表 4-2 导叶关方向实测数据（F—机组频率，Hz；Y—导叶开度，%）

F	49.21	49.42	49.61	49.81	50.00	50.22	50.41	50.63	50.81	51.01	51.20	51.41
Y	77.42	70.42	64.06	57.51	50.96	43.80	37.30	30.19	23.86	17.49	10.85	3.94

### (2) 空载摆动试验：最大摆动 0.13Hz（自动 3 分钟，见图 4-10）



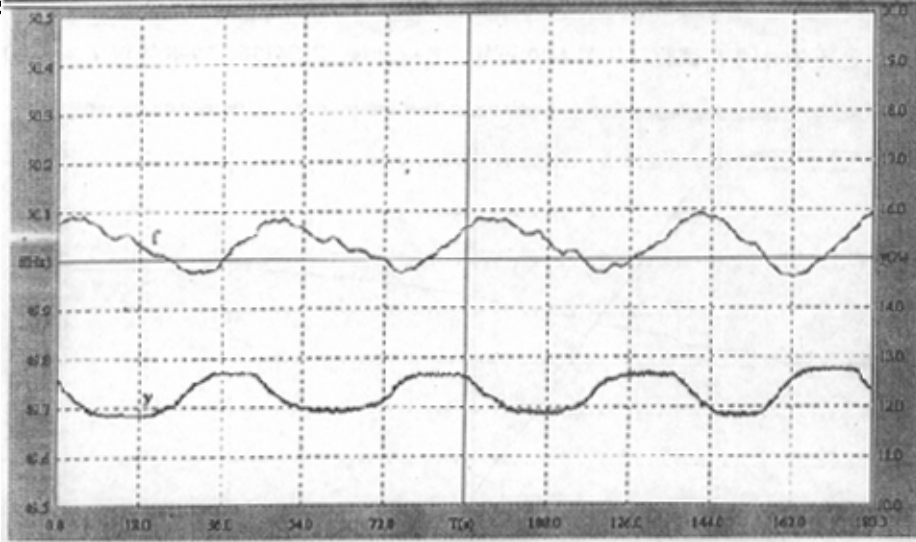


图 4-10 空载摆动 (自动 3 分钟)

- (3) 空载扰动试验 ( $K_p=4.2$ ,  $K_i=0.8$ ,  $K_d=2.5$ ,  $b_p=6\%$ ):  
 2Hz 上扰: 转速超调量=6.2%, 调节时间=16.9s;  
 2Hz 下扰: 转速超调量=21%, 调节时间=20s (见图 4-11)。

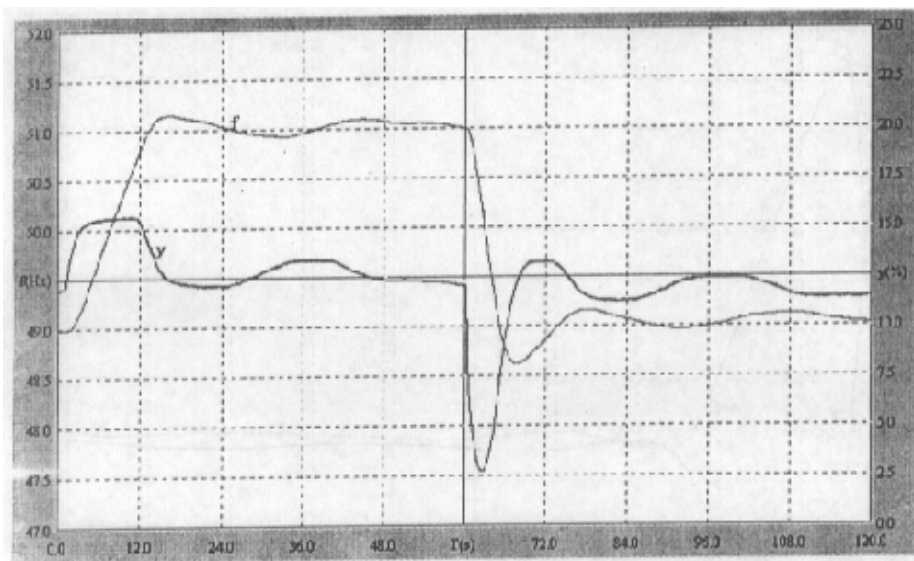


图 4-11 空载扰动试验

(4) 测不动时间  $T_q$  试验: 从图 4-12 可知,  $T_q=0.13s$  (IEC61362-1998 规定  $T_q \leq 0.2s$ )

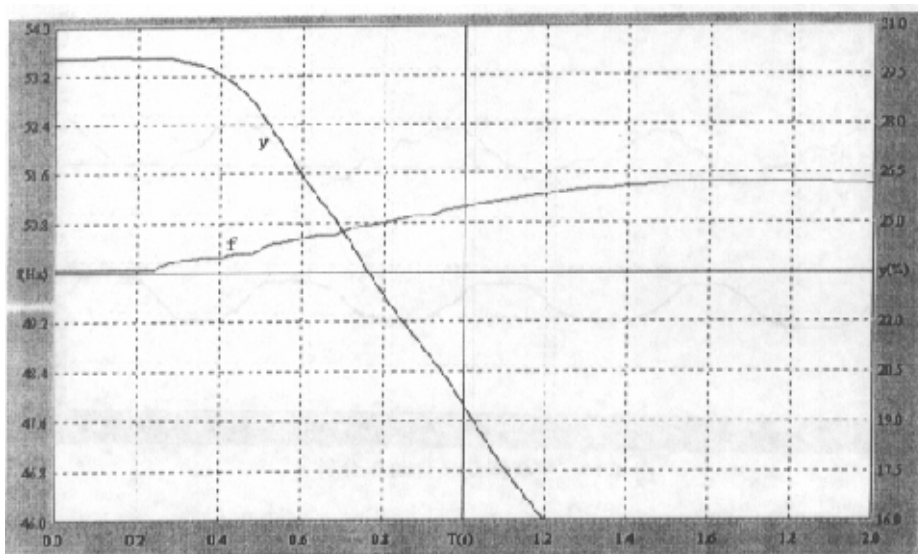


图 4-12 测不动时间试验

(5) 甩 100% 负荷试验: 转速最大值=118.7%, 调节时间=6.0s, 振荡次数=0.5 (图 4-13)。

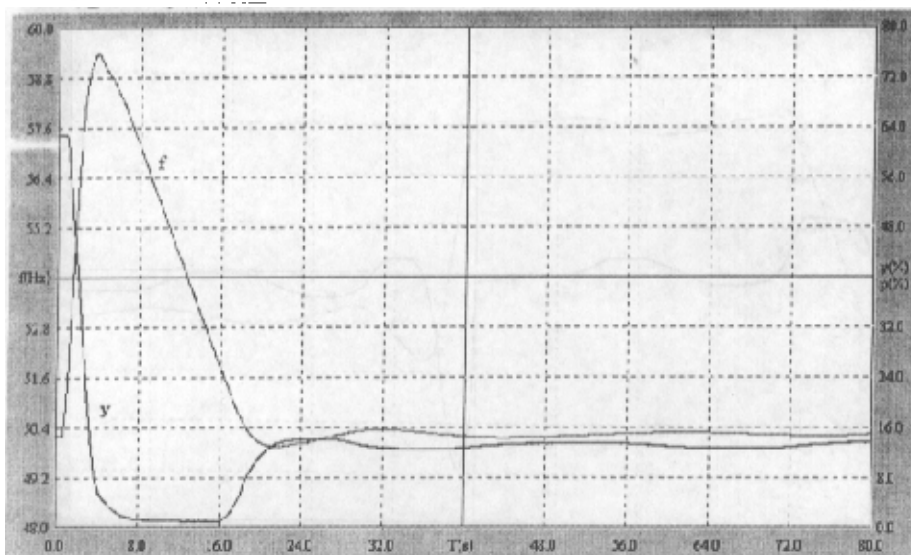


图 4-13 甩 100% 负荷试验

(6) 水轮机工况开机过程 (图 4-14) :

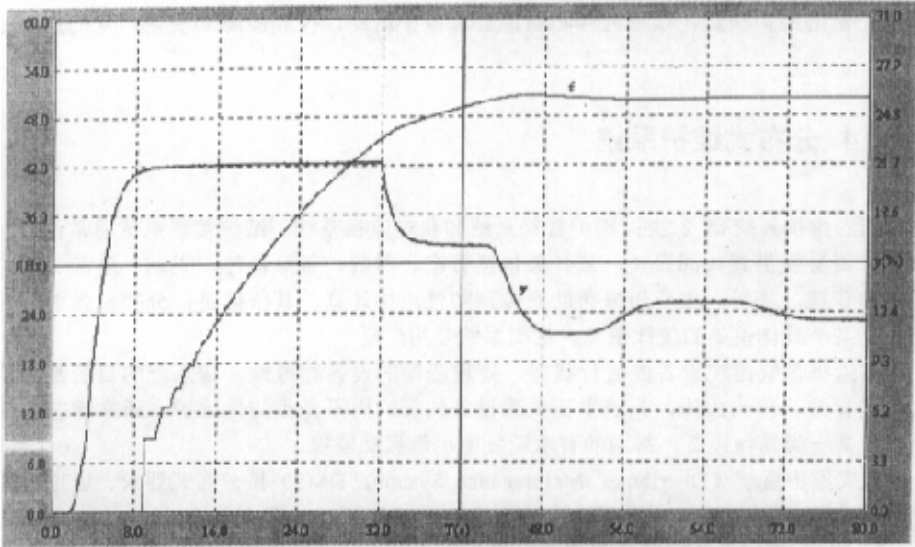


图 4-14 水轮机工况开机过程

## 4.11 抽水蓄能机组调节系统预知维护

计划维修具有盲目性, 浪费人力、物力、财力。随着经济向全球一体化迈进, 预知维护因可以显著降低企业运行成本而倍受企业界和学术界的关注。因此, 各电厂都在考虑将原来的计划维修改为状态检修或预知维护, 以减少维护费用。但是, 能够进行预知维护的前提是: 能实时地获得厂内各设备的相关动态信息及其趋势报告。ICMMS 能够满足这些要求。但设计、安装全新的 ICMMS 涉及面广、投资大。现实的做法是: 充分利用现有资源, 在已有设备基础上开展预知维护。为此, 本文提出在 ICMMS 体系下设计抽水蓄能机组调节系统和常规机组调节系统的预知维护系统, 将某些智能分布到调节系统中

### 4.11.1 调速器预知维护

象前面一样, 为简明起见以下用“调速器”统称抽水蓄能机组调节系统和常规机组调节系统, 因为在研究它们的预知维护系统时两者的区别并不重要, 换句话说, 本节的方法和结论对两类系统都适用。

由于维护问题直接涉及到设备及系统的性能、可靠性、可利用率、寿命及效益，至关重要。高效的维护系统应提供一种工具确定开展维护活动的最优时间，运行人员可以预测故障，通过及时的、预防性的维护尽可能地避免故障的发生，在恰当的时刻、对恰当的部位采取正确的维护决策，以便连续不断地管理维护活动，控制故障和失效，从而达到受控的维护。

## 4.11.1.1 分布式维护系统

常用的维护系统有 2 类：维护管理系统和状态监视系统。维护管理系统通常由软件公司和维护服务提供者共同设计，其任务包括资产、财政、备品备件、采购、资源、维护活动安排和管理，等等。主要用来帮助安排预防性维护计划。其依据是：分类设备的统计数据而不是某个具体设备的统计信息。这类系统使用广泛。

状态监视系统监视设备的运行状态、处理测得的设备物理量。该系统的目的是：检测设备功能异常、预测故障，系统主要关注设备的保护而不是预防性维护。通常状态监视系统是处理某一类具体设备，常用的有水轮发电机组振动监视。

分布式维护系统（Distributed Maintenance System, DMS）按分布式要求、以用户需求驱动原则在 CMMS 框架体系下设计整个电厂的维护系统，是基于现有 IT（Information Technology）标准的开放式柔性系统，可与上述 2 类系统交换信息，不仅如此，他将填补 2 类系统的空白，实现预知维护，减少基于时间的维护、增加维护效率、改进维护技能、减少维护成本。

## 4.11.1.2 调速器预知维护系统结构

一个企业或电厂的预知维护系统的实现牵涉面广，投资大。考虑到我国企业的实际情况，可以先建立机组级（车间级）或设备级的预知维护，积累经验后逐步扩展、推广。因此，下面将研究调速器的预知维护系统。

众所周知，调速器是电站的关键控制设备之一，是具有开机、停机、并网等机组控制和转速、功率调节等功能的机-电系统。它的可靠运行直接关系到电能生产质量和安全。国内电厂的通常做法是小修、中修、大修，即所谓的计划维护。其弊端显而易见。因此有必要开展预知维护。

调速器预知维护系统需要符合下列几点要求：①与 ICMMS 概念一致；②信息获取的方式是开放式的；③系统是柔性的；④具有可扩展性。考虑到系统资源的优化配置和系统特点，维护功能应按轻重缓急分布在不同的智能设备<sup>[88]</sup>中，它们之间通过信息总线协调工作实现对调速系统的维护（图 4-15）。

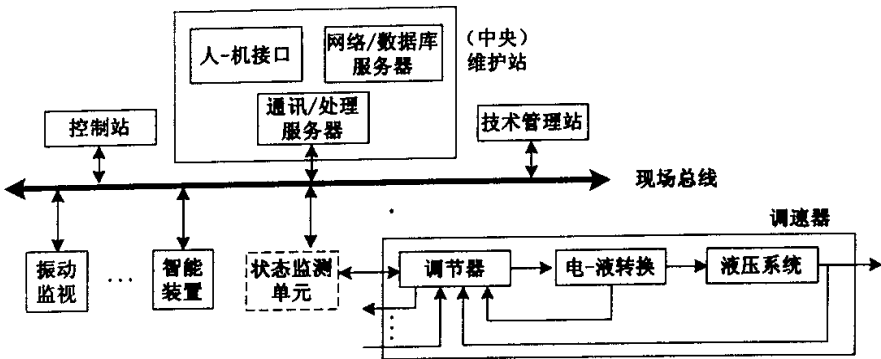


图 4-15 调速器维护系统结构

中央维护站（简称维护站）的任务是监视调速器的状态和过程，诊断刚发生的过程和事件，预测调速器的行为，作出维护决策，评估维护行为。它由通讯/处理服务器、网络/数据库服务器和人-机接口组成。通讯/处理服务器负责与现地维护站的通讯、历史数据更新、实时数据管理等工作；网络/数据库服务器对网络和数据库进行管理；维护专家则通过人-机接口监视、诊断、预测调速器的运行；此外，若需要，中央维护站还可以对维护活动进行远程维护（Remote Maintenance）。机组台数较少时，中央维护站可由一台高性能的工业 PC 机实现。

现地维护站向中央维护站传送采集的实时信息和短期历史数据，进行故障的初步诊断。它由数据采集服务器、实时维护数据库、总线接口和人-机接口组成。数据采集服务器进行变量的采集、检测和分析，记录短期历史数据；总线接口管理与调速器的通讯；人-机接口使得现场运行人员通过变量、动态曲线显示和报警信号监视调速器的运行状况。对传统调速器而言，现地维护站由状态监测单元和调速系统构成，状态监测单元由实时维护数据库、数据采集服务器和现地人-机接口组成，高度的开放性是其基本要求。当智能调速器具有预知维护功能时（象前面部分所述的那样），状态监测单元可以不要，直接由智能调速器实现现地维护的功能。即现地维护站已集成在调速器中。

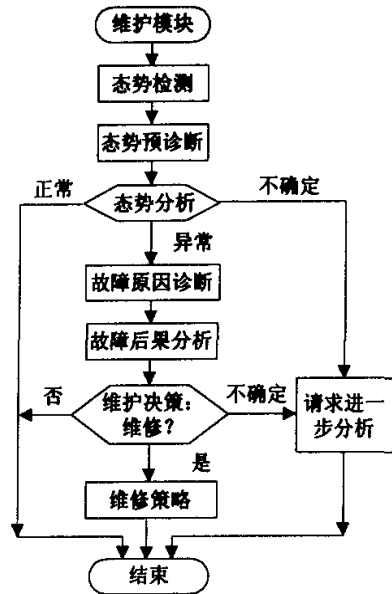


图 4-16 预知维护功能模型

## 4.11.2 预知维护功能分布与实现

构建一个信息 (IT) 系统精确地满足用户的维护要求常常是一件困难的工作, 因此, 必须用系统化的方法。调速器的预知维护系统根据用户的维护需求在 ICMMS 框架体系下进行设计。预知维护包括监视、故障诊断、故障预测、故障后果分析和风险分析、维护管理等子域。当掌握了用户的要求后, 将这些预知维护功能安排在各个不同的模块或设备中实现。被监控设备应具有智能性, 即智能的分布是必须的, 这将极大地缓解对通讯的压力; 也使各设备之间交换的是信息而不是数据。

事实上, 调速器维护系统的各个组成部分 (维护站、状态监测单元、智能调速器等) 都是具有智能参考模型的智能细胞。此智能细胞一方面通过请求、报告、观察、执行等外部信息流与其他模块 (维护的、控制的或管理的) 进行信息交换, 从而使上下级模块之间的关系, 从目前普遍采用的命令式转为协商式、会话式, 并使同级模块之间能充分交换信息, 互相协调, 使整个系统呈现出智能特征; 另一方面, 智能细胞的内部由目标分析、态势分析、状态及故障分析和决策分析四大部分组成, 四部分之间互相交换信息, 构成智能细胞的内部结构。预知维护模块的功能流程见图 4-16。通过对获得的数据分析, 利用知识库的规则, 对调速器的态势进行预诊断, 当发现态势异常后, 进行必要的故障诊断, 分析故障的后果, 从而决定是否进行维修; 不能作决定时请求进一步分析, 否则确定维护策略, 请求实施维护。

## 4.12 小结

本章在剖析抽水蓄能电站及其机组特点的基础上, 结合 IT 技术的最新发展, 提出了基于 ICMMS 思想的抽水蓄能机组调节系统硬件、软件体系结构, 实现系统的优化控制、维护和技术管理。开发了频率和开度的故障诊断和性能降低域过程 DP, 实现故障的类别确定、定位、趋势分析。不仅增强了调节系统本身运行的可靠性, 而且还向电厂预知维护子系统实时地提供状态、态势信息, 便于故障处理和故障预测, 简化了电厂维护子系统设计。在双机系统设计中发展传统双微机调速器的设计方法, 对传感器进行冗余设计, 进一步提高了系统可靠性。开发了嵌入式仿真模块, 方便调节系统调试。水泵优化控制软件确保抽水蓄能机组在最优状态运行。设计了菜单式中文彩色图形接口, 便于监视、操作和维护。给出了根据上述部分研究成果开发的抽水蓄能调节装置在工业现场试验的结果。

本章最后提出了一种用于抽水蓄能机组和常规机组调节系统的预知维护系统, 它按 ICMMS 框架设计, 包括状态监测、故障诊断、故障记录与追忆, 而且还有设备状态预测单元、故障预测单元、故障影响分析单元, 为预知维护提供决策支持。介绍了该预知维护系统的体系结构和功能模型。

## 5 用于巨型机组的 PCC 步进式水轮机 调节系统

**摘要:** 提出一种采用高可靠 PLC 作为硬件平台的用于巨型机组的 PCC 步进式双调节水轮机调速器, 它直接产生正反转脉冲控制步进电机, 用 PLC 内部高速计数器测频, 首次在 PLC 调速器中实现性能测试功能, 实现控制参数在线自整定, 用高级语言开发实时多任务调控软件, 具有 PLC 的高可靠性、C 编程的灵活性和 IPC 的实时性。该调速器也可用于三峡等单调节巨型水电机组。

### 5.1 问题的提出

可编程控制器 PLC (Programmable Logic Controller) 以高可靠性著称, 在工业领域得到了广泛应用。早期的 PLC 主要是为顺序控制应用而设计, 因而其过程控制能力和数据处理能力不强, 难以用于水轮机调速领域。1992 年华中理工大学在国内率先开展基于 PLC 的水轮机调速器的研究, 限于当时计算机技术的水平, 在控制算法、数据处理和频率测量方面采取了多种措施, 开发成功的第一台样机在我国最大的水电厂——葛洲坝大江电厂投入运行, 并于 1994 年通过了电力部主持的专家鉴定<sup>[55-57, 61]</sup>。“该项成果在国内首次实现功率控制, 首次将 PLC 用于大型水轮机的控制, 达到国内领先水平” (鉴定委员会语)。继华中理工大学之后, 其它研究单位和制造厂家纷纷开展了以 PLC 为调速器硬件平台的研究。很快 PLC 水轮机调速器以其高可靠性在水电站得到了广泛应用。

但 PLC 调速器存在的某些问题也一直未能得到完满解决。例如, PLC 用工程技术人员熟悉的梯形图编程, 简单易用, 其不足之处是不灵活, 难以描述复杂的控制思想; 通过 A/D、D/A 模块控制步进电机的方式虽然实现简单, 但由于模块延时已成为提高调速器性能的瓶颈; 通常 PLC 内部高速计数频率偏低, 用于大型机组的调速器为了提高测量精度自行设计测频模块<sup>[55]</sup>, 但在我国调速器厂家现有设备和条件下, 难以保证自制模块的高可靠性; 嵌入式性能测试功能已被证明极为实用<sup>[53]</sup>, 但中低档 PLC 因资源有限、编程语言等原因难以实现。诸如此类的问题妨碍了 PLC 调速器动静态性能和可靠性的进一步提高, 故它们主要用于中小型和部分大型机组的控制。而巨型机组在电力系统中具有重要的地位, 它的可

靠性和性能直接影响电网的安全和电能质量。因而前述的 PLC 调速器难以直接用于此类巨型机组。为了解决上述问题,在科技部技术创新基金、国家重大科技项目攻关计划“三峡水利枢纽工程成套设备”之子项——全数字式水轮机调速器的资助下,提出用一种新型的可编程控制器(PLC)——PCC(Programmable Computer Controller)构成用于巨型机组的水轮机调速器,用类似于 C 的高级语言开发,实现高级控制算法;直接产生正反转脉冲控制步进电机,彻底解决了性能瓶颈;直接用 PLC 内部高速计数器测频,使测频精度和可靠性都得到保证;通过实时多任务处理,首次在 PLC 调速器中设计性能测试功能模块。工业现场运行证明了该研究思路是正确的,达到了预期目标。

## 5.2 PCC 步进式调速器硬件配置和软件设计

PCC 调速器的电-位移控制系统采用 PCC+驱动器+步进电机+丝杠+位移传感器的结构形式,液压随动系统采用引导阀+辅助接力器+主配压阀+主接力器+机械反馈的结构形式。硬件设计除了与系统结构模式有关外,还涉及到控制器结构、控制策略、通讯等问题。

下面重点就电液转换器和通信方式的选择进行讨论。

### 5.2.1 步进机电液转换器

市场上比较有代表性的电液转换元件有<sup>[47-49]</sup>:

① HDY 型环喷式电液转换器,其特点是滤油精度  $140\mu\text{m}$ ; 频响性能  $\geq 7\text{Hz}$ ; 位移输出; 有“复中”特性。

② DYS 型双锥阀式电液转换器,其特点是滤油精度  $100\mu\text{m}$ ; 频响性能  $\geq 5\text{Hz}$ ; 位移输出; 有“复中”特性。

③ 电液伺服比例阀,此阀结合了伺服阀和比例阀的优点,既有伺服阀的高精度高响应性,又有比例阀的出力大、耐油污能力及防卡能力强等特点;电磁操作力为常规电液转换器的 5 倍以上;有“复中”特性。

④ 步进电动机式电液转换器,其特点是滤油精度  $200\mu\text{m}$ ; 脉冲最高频率  $1\text{kHz}$ ; 满行程步数 1055 步; 液压缸活塞最大输出行程  $50\text{mm}$ ; 积分型电液转换元件,无“复中”特性,可代替常规的电液转换器和中间接力器,成为合二为一的电液随动元件。

⑤ 步进电动机-丝杠位移转换装置,其特点是不需用油;步进电机接收脉冲,直接转动丝杠,形成位移输出;设计行程  $165\text{mm}$ ,为积分型电液转换元件,无“复中”特性,可代替常规的电液转换器和中间接力器,成为合二为一的电脉冲-位移随动元件。

上述①~③防油污和防卡能力较差,但频响性能好,可构成一级液压随动系统;第⑤种不用油,彻底解决了电液转换器容易发卡的问题,显著提高了调速器的可靠性。随着技术进步,其频率响应可满足调速器动态性能的要求。原先主要用于构成 2 级液压随动系统,



现在正在设计一级液压随动系统，实践证明它是一种符合我国国情的电液转换元件，广受用户欢迎。

PCC 调速器采用步进电机-丝杠位移型在步进电机式电液转换器，摒弃现行的用 A/D、D/A 控制方式，提出数字电平控制。与传统的用油电液转换器相比，具有以下主要特点：①电柜内无功率放大板等模拟电路，避免了模拟放大电路存在的漂移、抗干扰性能差等问题；②取消了电液转换器、手/自动切换阀、手动增/减电磁配压阀等以及这些部件相应的油管道，机械柜内除引导阀、主配压阀、紧急停机电磁配压阀外，其它部件不用液压油；③取消了电动开度限制机构，简化了机械杠杆，不需要高精度油源，因此降低了对滤油器的要求（仅供引导阀和紧急停机电磁阀用油），采用了刮片式滤油器；④系统结构简单，稳定性好，可靠性高，抗干扰能力强。

## 5.2.2 PROFIBUS 现场总线\*

现代调速器设计中一个重要问题是：采用何种通信方式与其它设备交换信息。随着计算机技术的不断发展，现场总线以其独特的优势成为首要选择。

现场总线是计算机网络适应工业现场环境的产物。在计算机数据传输领域广泛使用的 RS-232C 和 CCITT V.24 通信标准是一种低数据速率和点对点的数据传输标准，无能力支持更高层次的计算机之间的功能操作。同时，在复杂或大规模的工业现场或生产自动化领域中一般要使用大量的、分布很广的传感器、执行器和控制器，如果在低层次上采用传统的星型拓扑结构，那么安装成本和介质造价都将非常昂贵；若采用流行的局域网 LAN (Local Area Network) 组件及环型或总线型拓扑结构，虽然可以减少电缆长度，但是增加的 LAN 介质及相关硬件和软件又使其系统造价与星型系统相差无几。所以在最低层次上的确需要设计出一种造价低廉而又能经受住工业现场环境的通信系统，现场总线就是在这种背景下产生的。1983 年 Honeywell 公司在输出的 4mA~20mA 直流信号上成功地叠加了数字信号，从而使现场装置与控制室控制装置之间的连接由模拟信号过渡到了数字信号。在此基础上，美国的 Rosemount 公司配合使用了它自己的 HART 数字通信协议。到了 1987 年，美国的 Foxboro 公司发表了智能式自动控制系统，系统中使用了全数字通信。

现场总线虽然必须设计成开放系统，基于下述原因，其网络结构并不需要保持与 OSI 系统完全一致：

- 面向控制的信息量通常有限，但要求快速而可靠地到达目的地。而 7 层模式使数据转换远远慢于实时操作要求；
- 与 OSI 系统有关的网络接口的造价对现场总线系统来说显得过高，包括 OSI 系统所有各层的总开销对现场总线的应用来说都显得太高了；
- 现场总线设备并不需要 OSI 地址；

\* B&R. PROFIBUS User's Manual. 1996

- 现场总线网络可采用低成本的桥接器、路由选择器和网间连接器等实现与其它开放式系统的连接。

于是，现场总线采用了 3 层网络结构——物理层、数据链路层和应用层。流量控制和差错控制在数据链路层中执行，报文的可靠传输在数据链路层或应用层中执行。这种网络结构具有结构简单、执行协议直观、价格低廉等优点，同时性能又令人满意。因此现场总线是一种具有简化网络结构的开放式实时系统，是过程现场与自动化控制装置之间一种有效的串行数字通信链路。

现场总线体系结构模式见图 5-1。

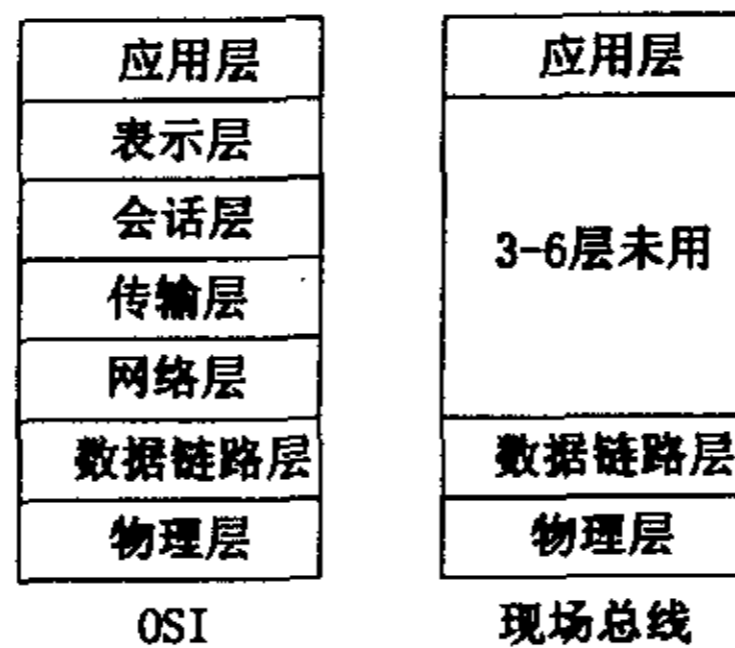


图 5-1 OSI 和现场总线的模型结构

对于工业领域来讲，采用现场总线有许多优点，其中最大的优点就是：大大节约连接导线、维护费用和安装费用，能够同时传送多个过程变量；其次是数字信号的精确性；同时由于现场总线是双向的，因此能够从中心控制室对现场智能设备或装置进行标定、调整及运行诊断，甚至能够在故障发生前进行预测；一个更为重要的方面是装置的兼容性可以使用户大大受益。

## 5.2.2.1 PCC 网络通信结构

计算机网络和现场总线技术是推动 PCC 或 PLC 发展的不可缺少的因素，它们提高了 PCC 的控制能力及控制范围；可以实现综合及协调控制，把对设备级的控制提高到对生产线的控制；实现计算机监控及管理。如今几乎每个 PLC 生产厂家的产品都具有网络通信能力。B&R 公司的 2000 系列可以进行远程 I/O、CAN BUS、PROFIBUS、以太网等网络通信。而且由于 PLC (PCC) 在现场自动化应用的要求，该公司又在网络的基础上，结合分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS) 与现场总线技术，实现了管理层、控制层与现场总线层的网络技术，旨在发展分层分布式网络结构。

所谓分层是指系统有三层结构，每一层都有各自的协议规范；分布式则是指每一层采用的拓扑结构为分布式。

管理层——这是整个网络的最高层次。整个系统的图文显示、管理决策制定与实施、各子系统间或与外系统间的信息互换与交流以及数据库管理等职能都属于这个网络层次的范畴。它同时又是广域网的节点。以太网的 TCP/IP 是管理层最常用和值得推荐的通信协议；

控制层——这个层次的各个子站都是控制或监控功能的集成节点。开放式、标准的现场总线是构成此层面的手段。PROFIBUS 是此层面值得推荐的网络；

现场层——这个层面上的各个子站都紧靠现场的传感器和执行机构。传感器或现场信号能及时被采集，系统对执行机构的指令能迅速得以贯彻。同样，开放式、标准的现场总线如 PROFIBUS 和 CAN BUS 也是构成此层面的手段。

控制层和现场层是控制系统的灵魂。因此 2000 系列的这两层网络具有以下特点：

(1) 标准化的现场总线模式。所用的现场总线不是厂家自己的标准。它是标准的现场总线，并具备总线式和树状灵活的拓扑结构。同时它具有开放式的现场总线支持 (Open Fieldbus Support)。

(2) 智能分布式拓扑结构。为使整个系统具备高度的安全可靠性能，控制层和现场层的现场总线网络具备智能分布式的拓扑结构，其特点如下：

- 设备既可通过当地人机界面控制，又可以通过主站控制；
- 当主站出现问题时，其它从站能照常工作；而当从站出现问题时，主站与其它从站照常工作；当某一站出现问题时，有错误记录功能，待重新恢复时，能够进行错误分析；
- 主站的计算机可接入控制层的任意一子站。

## 5.2.2.2 PROFIBUS 的拓扑结构及传输机制

PROFIBUS 即过程现场总线 (PROcess Field BUS)，用来实现总线所连的 I/O 元件、传感器和执行器之间的通信，它是适用于各种类型自动化设备的标准化网络，是不依赖于生产厂家的、开放式的现场总线。

传统的主从网络具有图 5-2 所示结构，主机控制总线，向从站发送命令，从站只能与主站相互通信，从站之间不能通信。而多主站系统是多个主站的一个逻辑环，每个主站凭借令牌依次成为当前活动主站，具有令牌的主站成为客户机 (Client)，所有其它的非当前主站是服务器 (Server)，当前主站在完成其任务后，将令牌传递给下一个主站。

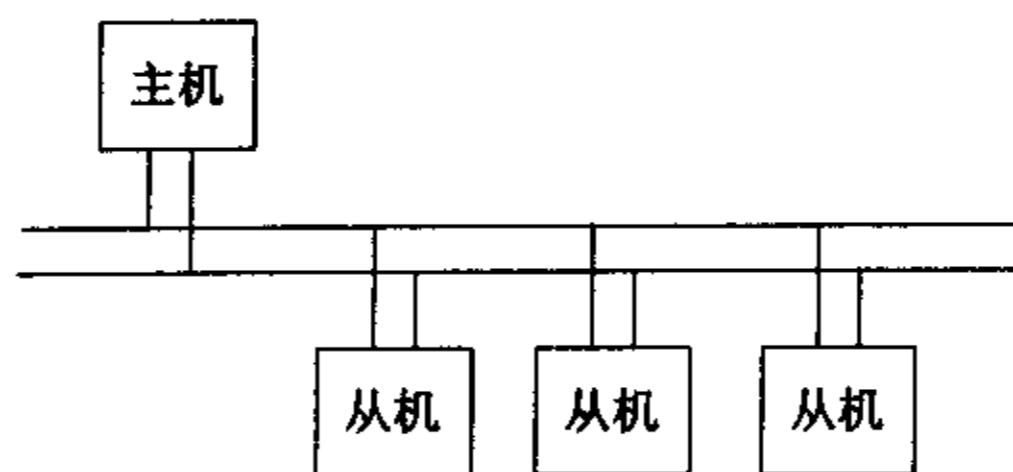


图 5-2 传统的主从网络拓扑结构

过程现场总线 PROFIBUS 为多主多从网络，是这两种系统的复合（图 5-3）。令牌环传递辅以更低级别的主从协议，响应方法可以区别主站和从站。令牌主站是智能站，也就是具有独立的计算处理能力，当一个主站接收到令牌环，就获得了对系统的控制权，在规定的的时间过后，它把令牌环传递到网络的下一个主站（在 PROFIBUS 中按升序传递），如果该主站不希望发送信息，就立刻传递令牌环到相邻的主站模块。从站不接收令牌也就没有总线控制权。一个主站可以和任何其它主站和从站通信，但从站只能响应主站请求，或应答或回送给主站相应的信息。因此从站只需要协议的一小部分，所以实现起来特别方便。该网络的拓扑结构如图 5-3 所示。

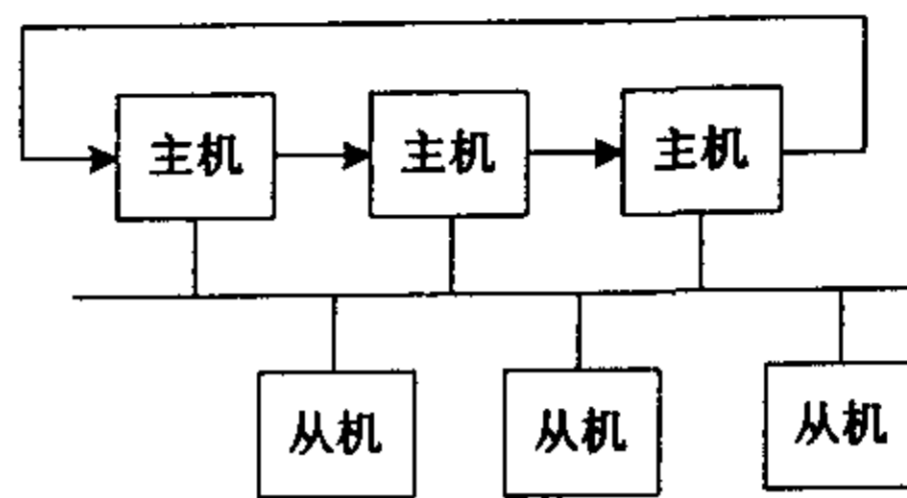


图 5-3 PROFIBUS 的多主多从复合拓扑结构

所谓令牌，亦称之为“通行证”或“标记”，其具体形式是一条特殊的报文或控制帧，它在主站之间传递总线控制权。网络形式不同，令牌传递方式也不同。令牌有忙闲两种状态，这两种状态代表信道是否空闲以供节点站接入使用。闲令牌到达某个站时，相当于把信道的使用权交给了该节点站。因此，需要使用信道发送数据的节点在闲令牌到达了自己的站接口时，立即将其接收下来，从而把握信道的使用权。这时，在逻辑上表示本节点已接入了信道，可把本站的数据发送出去，并向信道放回一个忙令牌，以暗示其它节点“信道已被占用”。待本节点把报文数据发送完毕后，再放出一个闲令牌，以表示此时信道已空闲，下一个需发送数据的节点站又可获得信道的使用权。因此，令牌传递方式属于分布控制式按需分配信道资源的多址接入技术，不会发生信道冲突。

PROFIBUS 采用的是广播地址或多播地址的传输方式。它的协议包括两部分：

PROFIBUS DP——分布 I/O 系统，是一种经过优化的模块，有较高的数据传输率，适用于系统和外部设备之间的通信，远程 I/O 系统尤为适合，它容许高速度周期性小的小批量数据通信，适用于对时间要求苛刻的场合，如：加工自动化。

PROFIBUS FMS —— 现场总线信息规范，是为现场的通用通信功能所设计的协议，FMS 提供大量的通信服务，用以完成中等传输速度进行的循环和非循环的通信任务，适用于一般的自动化行业。

PROFIBUS 采用 RS485 双绞线进行传输，不带中继器时传输距离可达 1200m，带 3 个中继器则能达到 4800m。

### 5.2.3 PCC 调速器硬件配置

B&R 公司将其生产的可编程逻辑控制器 (PLC) 命名为 PCC, 即可编程计算机控制器, 其实质是在 PLC 中加入了某些工业控制机 (Industrial Personal Computer, 简称 IPC) 的思想, 是 PLC 与 IPC 及计算机集散控制系统相互融合的产物, 具有智能分布式控制思想, 有较强的分析运算能力, 具有基于标准化的开放性和兼容性, 通用性好。除了具有所有 PLC 的功能外, 还具有高速计数、ms 级触发信号、伺服电机、步进电机控制等功能, 因而可构成高精度分布式运动控制系统和开放式现场总线系统。由于 PCC 也是 PLC, 可靠性极高, 其 MTBF 超过 50 万小时。

B&R PCC 的 CPU 模块包含三个处理器: I/O 处理器、双向口控制器 (DPR-Controller) 和 CPU 处理器。它们既彼此独立, 又通过 DPR 相互关联, 使主 CPU 资源得到合理利用, 同时最大限度地提高了系统的处理速度, 使系统具有高速响应能力。

在硬件配置方面, 主要考虑解决现有 PLC 调速器在频率测量、步进电机控制等方面存在的不足。通常 PLC 内部计数频率较低, 难以满足调速器调节精度要求。而用于大型机组的 PLC 调速器不得不自行研制智能测频模块, 将频率计算、处理后送到 PLC<sup>[53, 64]</sup>。在厂家现有条件下, 难以保证达到可与 PLC 相比的高可靠性, 这直接降低了整机的可靠性; 另一方面智能测频模块与 PLC CPU 模块交换信息引起的延时, 也影响调速器的性能。本文直接使用 PCC 高速计数模块, 其最高计数频率 >4MHz, 在额定频率附近, 分辨率达万分之 0.125, 完全满足大型调速器测频要求。在步进电机控制方面, 摒弃通过 D/A 模块控制步进电机旋转速度的方法, 而直接向步进电机发正反转脉冲, 有效地减少了时延, 提高了响应速度, 消除了普通步进式调速器的性能瓶颈。高速计数和步进电机控制均由高速处理模块 TPU 实现 (见图 5-4)。人-机对话的设计考虑了技术发展的现状及趋势。随着 LCD 价格下降, LCD 显示逐渐受到青睐。PCC 容易与具有触摸屏的 LCD 相连, 从而以可视化全中文界面显示机组运行状态、关键参数动态曲线、调速器控制参数和实时故障信息; 通过触摸屏可修改相关运行参数、检索有关故障和操作记录、率定传感器等。为了防止非授权修改, 设置了多级密码保护。

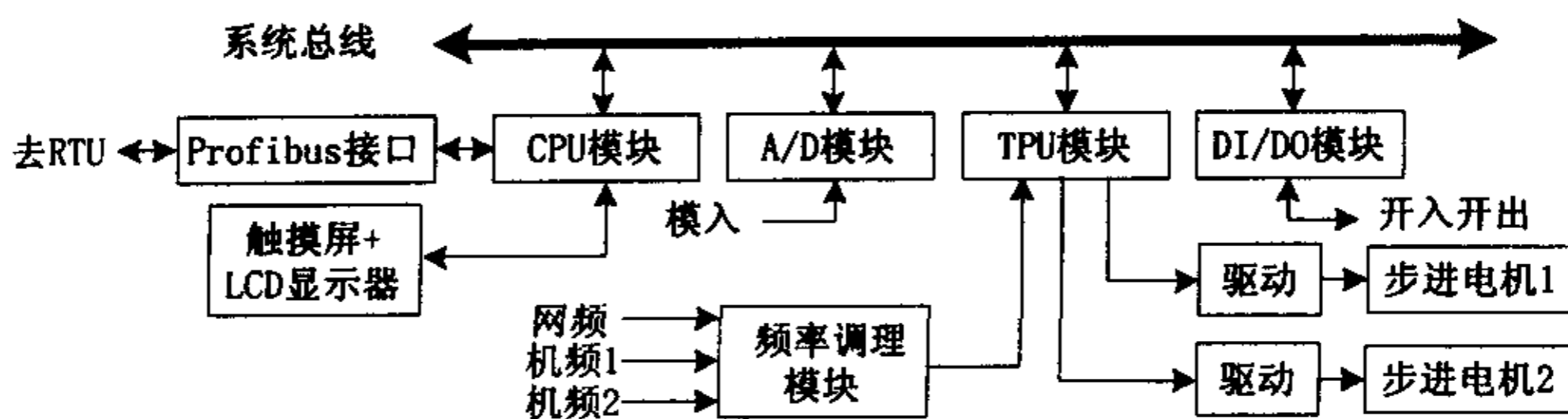


图 5-4 PCC 步进式双调节水轮机调速器硬件框图

## 5.2.4 PCC 调速器软件设计

梯形图语言对工程技术人员来讲很方便,因而得到了广泛应用,中、小型可编程调速器均用梯形图开发。但是,它难以实现复杂的控制规律,即便能实现,其程序冗长,可读性差,不利于软件维护。PCC 编程语言符合 IEC61131-2 规定,除了可以用梯形图 LAD 和指令表 STL 编程外,还可以用 PL2000 编程。PL2000 类似于 C 语言,其语法规则相当简单,和梯形图一样易学易用。可插入注释行,其编辑器是语法敏感的。公式化的编程语言,使得容易实现结构化、模块化编程思想,软件易于维护和管理,可读性大大提高,也便于实现高级控制规律。因此,本文用 PL2000 开发调速器软件。B&R PCC 具有较大的应用程序存储空间和数据空间,这使得系统具有较高的系统分析计算能力和较强的数据块处理能力。

B&R PCC 采用多任务分时操作系统,因此,将整个调速器程序分成数个具有不同优先权的任务等级。频率测量与处理单元、步进电机控制单元、模拟量测量单元作为最高优先级;容错处理单元、智能控制策略单元等作为次高优先级;而性能测量和性能指标计算单元作为低优先级。优先权高的任务等级具有较短的扫描周期,而每一个任务等级包括多个具体任务,这些任务又细分优先权。优先权高的任务总是先被执行,剩余的时间里执行优先权较低的任务等级。这样整个控制系统得到了优化,充分利用了有限的机器资源,既保证了实时性要求高的关键任务得到及时处理,又实现了多任务。

## 5.3 控制参数自整定

水电站个性强,建立其通用模型相当困难;而且难以得到准确的被控对象的参数。因此,对调速器参数进行理论整定往往与实际情况相差甚远,通常在运行现场通过试验确定。但现场进行参数调整必须在有限时间里迅速完成,以节约宝贵的水资源,因而要求工程技术人员有较好的控制理论素养和参数调整经验。这对多数电站的多数技术人员来讲决非易事。为此,本文试图通过调速器参数在线自整定解决该问题。其优化目标是:调速器以较小的超调量迅速完成动态过程,即:

$$J = wK_1\sigma_p + (1-w)K_2T_s \Rightarrow \min$$

式中  $\sigma_p$  是超调量(%),  $T_s$  是过渡过程完成时间(s),即调节时间,  $K_1$ 、 $K_2$  是比例因子,  $w=0\sim 1$ , 是加权因子,反映对减小超调量的重视程度。调速器具有在线自优化功能,一旦操作人员设定优化目标函数中的权因子  $w$ 、发出优化命令后,调速器将自动进行有限次扰动试验以便确定当前工况下的实际最优参数。例如:某电站空载工况下频率扰动量 = +3 Hz,在线自动寻优前后的 PID 参数、动态性能指标超调量、调节时间见表 5-1。显然,在参数优化后系统的动态性能得到了较大提高。如果操作人员对该次寻优结果不满意,可再发优化命令,调速器将在本次优化参数的基础上自动进行下一次寻优。这样,经过若干次寻优,调速器可以自动找到满意的控制参数。

# 华中科技大学博士学位论文

表 5-1 参数自整定结果比较

	$K_p$	$K_i$	$K_d$	超调量 (%)	调节时间 (s)
寻优前	3	1	1	48.8	8.4
自动寻优后	3.5	0.4	0.8	25.3	9.72

如果能得到电站详细的技术参数，借助于本机内嵌的被控对象仿真模块，可在制造厂内初步确定调速器的控制参数，从而有效地减少工业现场参数自寻优的次数和时间，节省宝贵的水资源，增加电厂的经济效益。

## 5.4 工业现场试验

PCC 步进式双调节水轮机调速器于 2001 年 4 月在三峡总公司葛洲坝大江电厂 16 号机组上投入运行。该机是轴流转浆式双调节水轮发电机组，额定出力 125MW，根据情况出力可增加到 134MW，运行水头 8m~23m。在正式投运前，进行了全面试验，主要试验结果如下：

(1) 静特性试验：

实测数据见表 5-2。转速死区  $i_s = 0.01\%$ ，开方向非线性度=0.082%，关方向非线性度=0.078% (IEC61362-1998 规定  $i_s < 0.04\%$ )。

表 5-2 实测数据

机组频率 (Hz)	51.00	50.80	50.60	50.40	50.20	50.00	49.80	49.60	49.40	49.20	49.00
开方向接力 器行程 (%)	14.75	22.42	29.89	37.85	45.98	53.68	61.18	68.85	76.23	83.86	91.58
关方向接力 器行程 (%)	14.75	22.60	29.96	38.09	46.18	53.85	61.35	69.00	76.37	83.97	91.70

(2) 空载摆动试验：最大摆动 0.136Hz (自动 3 分钟，见图 5-5)。

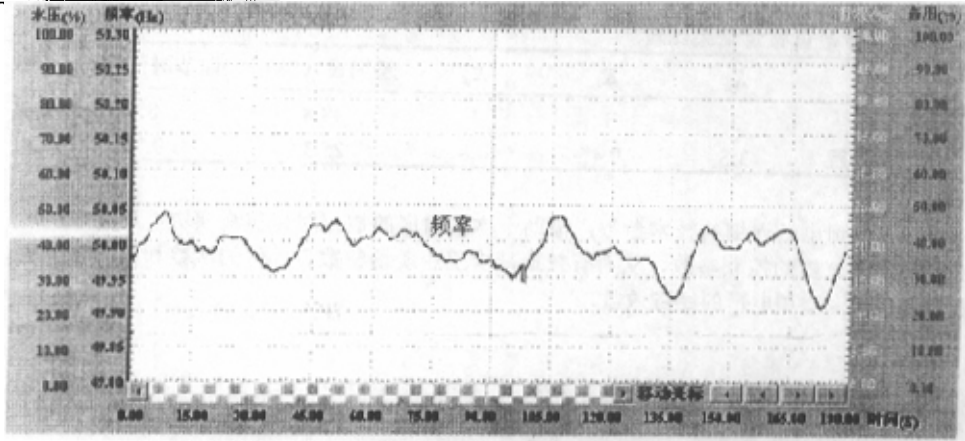


图 5-5 空载摆动试验

(3) 空载扰动试验:

4Hz 上扰: 转速超调量=1.2%, 调节时间=14.2s (图 5-6);

4Hz 下扰: 转速超调量=2.8%, 调节时间=28.4s (图 5-7);

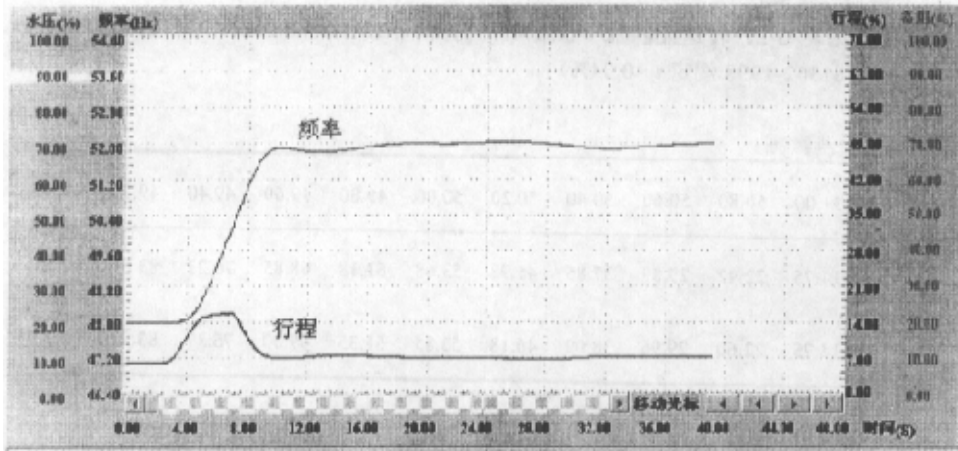


图 5-6 空载扰动试验 (4Hz 上扰)



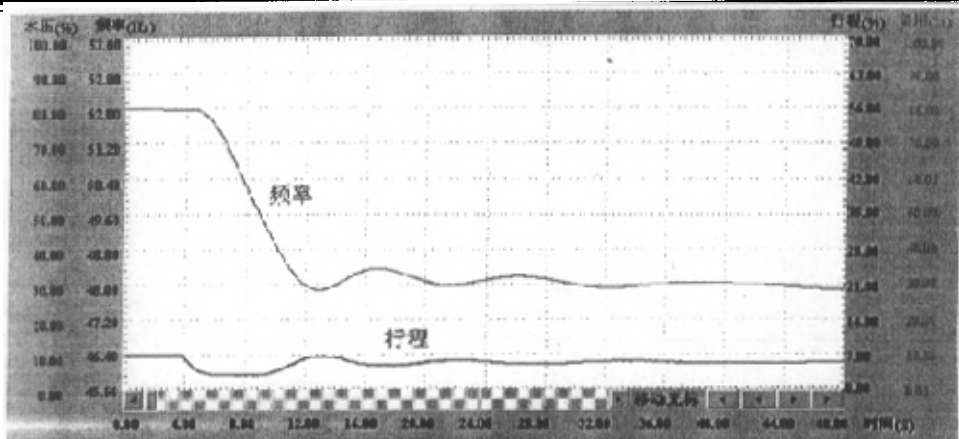


图 5-7 空载扰动试验 (4Hz 下扰)

(4) 甩负荷试验:

最高转速为 136.0%，转速波动次数为 0.5 次，转速调节时间 22.1s (图 5-8)。

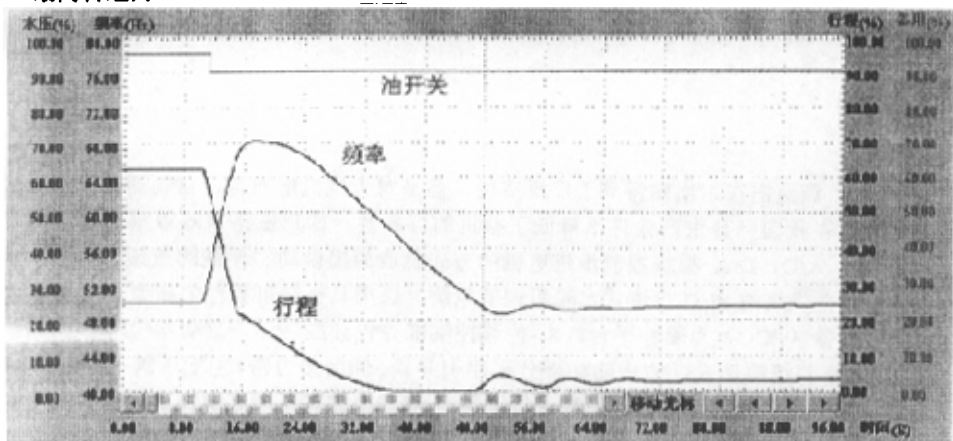


图 5-8 甩负荷试验

(5) 测不动时间  $T_q$  试验: 从图 5-9 可知,  $T_q=0.2$  s (IEC61362-1998 和国家标准规定  $T_q \leq 0.2$  s), 由于该机组  $T_q=7.46$  s,  $T_w=3.06$  s,  $T_w/T_q > 0.4$ , 超过国家标准规定的范围, 不应以国家标准衡量。事实上, 该机组以前的 2 台调速器不动时间均超过本次测量结果。

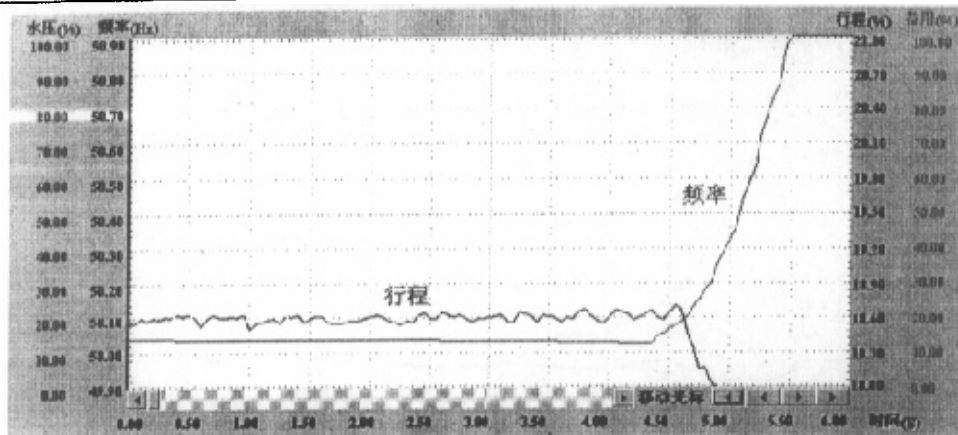


图 5-9 测不动时间试验

此外，还对控制参数自调整、性能自测试、步进电机失步诊断等功能进行了试验，符合设计要求，达到了预期研究目标。该调速器已投入工业运行，不久将进行部级鉴定，并通过科技部创新基金项目验收。

## 5.5 小结

现有 PLC 调速器在水电站得到了广泛应用，但是对大型机组而言，自制测频模块虽然保证了精度但在我国当前生产条件下降低了整机的可靠性；梯形图语言难以描述复杂的控制思想；通过 A/D、D/A 模块控制步进电机的方式已成为提供动态性能的瓶颈。为此，本章提出用于巨型机组的 PCC 步进式水轮机调节系统，选用具有高可靠性的新型 PLC—可编程计算机控制器（PCC）为硬件平台，电-位移控制部分设计成 PCC+驱动器+步进电机+丝杠+位移传感器的结构形式，液压随动部分采用引导阀+辅助接力器+主配压阀+主接力器+机械反馈的结构形式，用步进电机代替了传统的电-液转换方式，彻底解决了电液转换器容易发卡的问题，显著提高了调速器的可靠性。与 RTU 的通信采用现场总线 PROFIBUS（也可根据电厂的实际情况更换通信模块变成 RS-485 或 RS-232C）。直接用 PCC 内部的高达 4MHz 的计数模块测量机组频率和电网频率，在提高测频精度的同时确保可靠性。PCC 直接产生正反转脉冲控制步进电机，有效减少时延。实现调速器控制器参数自优化功能，解决调速器参数难以整定的问题。内嵌被控对象实时仿真模块，方便调试。调速器特性测试功能进一步挖掘了 PLC 的潜力，方便了用户。PCC 步进式调节系统具有 PLC 的高可靠性、C 编程的灵活性和 IPC 的实时性，可用于三峡等巨型机组。本章研究成果对开发新型的抽水蓄能机组调节系统具有参考价值。

## 6 全文总结与研究展望

本文首先系统总结了抽水蓄能电站及其控制技术的发展、维护技术、建模与仿真技术、智能控制及其在水电机组中的应用的现状,结合中国-欧盟合作研究项目 EIAM-IPE (INCO DC Project 961744)、九五国家重大科技攻关项目子题——三峡全数字式水轮机调速器研究、科技部技术创新基金(19994204040699)、东方电机股份有限公司和宜昌市能达通用电气股份合作公司委托科研项目,首次提出在 ICMMS 框架体系下设计抽水蓄能机组调节系统,研制了我国第一台抽水蓄能调节系统和用于巨型机组的 PCC 步进式双调节调速器。本文具有如下创新:

1. 提出了基于 ICMMS 思想的新型抽水蓄能机组调节系统硬件、软件体系结构,实现系统的控制、维护和技术管理。提出并实现对开度和频率测量模块进行故障诊断和性能降低诊断。

2. 提出了一种新的抽水蓄能机组调节系统软件体系结构,包含多个域过程 (Domain Process)。

3. 提出并实现调速器控制参数自整定,提出调速器智能积分控制策略,在变参数控制中,不宜切除积分项而应改变积分强度。

4. 实现步进电机防失步智能控制,既可高速启动满足快速性,又不会造成失步满足可靠运行要求。

5. 提出将预知维护智能分布到抽水蓄能调速器,提出了一种用于抽水蓄能调速器的预知维护系统,它按 ICMMS 框架设计,不仅包括状态监测、故障诊断、故障记录与追忆,而且包括设备状态预测、故障预测、故障影响分析、维护决策支持。

6. 研制出我国第一台抽水蓄能调速器,已转化为工业产品,产值 480 万元。

7. 在分析传统建模与仿真方法特点基础上,提出分布式、面向环节的、可视化抽水蓄能机组调节系统建模与仿真。开发了基于 MATLAB with SIMULINK 的开放式可视化模型库和图形用户接口,在该仿真平台上研究了水轮机调节系统孤网运行的稳定性。

8. 提出一种采用高可靠 PLC 作为硬件平台的用于巨型机组的 PCC 步进式双调节水轮机调速器,直接用正反转脉冲控制步进电机,有效减少时延,消除了步进电机控制中性能瓶颈;用 PLC 内部高速计数器测频解决了大型 PLC 调速器测频模块可靠性问题;首次在 PLC 调速器中实现实时仿真和性能测试功能。具有 PLC 的高可靠性、C 编程的灵活性和 IPC 的实时性。该调速器也可用于三峡等巨型、单调节机组。

今后将在如下方面继续研究:

1. 研制出抽水蓄能调速器预知维护系统,并寻找一个电站安装运行,以验证其实用性。现已得到华中科技大学研究生院研究基金资助,预计 1~2 年内可以全部完成。

2. 将继续研究、寻找一种简便的模糊控制参数和规则库的调整方法,使模糊控制技术用于抽水蓄能机组调节系统的工业实际运行。

3. 进一步丰富、完善基于 MATLAB with SIMULINK 的分布式、面向环节的、可视化抽水蓄能机组调节系统仿真平台的模型库,使之适用于更多的电站。

## 致 谢

本文是在叶鲁卿教授精心指导下完成的，叶老师渊博的学识、严谨的治学态度时刻激励着我积极进取。在此，对导师表示崇高的敬意和由衷的感谢。

本研究得到了中国-欧盟合作研究项目 EIAM-IPE (INCO DC Project 961744)、九五国家重大科技攻关项目子题——三峡全数字式水轮机调速器研究、科技部技术创新基金 (19994204040699)、东方电机股份有限公司和宜昌市能达通用电气股份合作公司的资助，所有合作伙伴为项目的顺利完成做出了重要贡献。特别值得一提的是：课题组李朝晖教授为作者提供了许多帮助和有益的建议；作者在法国研究期间，法国国家科学研究中心南锡自动化研究所 (CNRS-CRAN) Morel 教授、Iung 教授不仅提供了工作上的支持和学术方面的启发，而且在生活方面也提供了及时帮助，Nancy-Metz 欧洲大学联盟主席 Lucuis 教授和 Lamboley 女士也提供了帮助；东方电机股份有限公司孙邦彦、黎道成、丁薇主任，马劲松经理、邬廷军总工程师、陈力高级工程师，宜昌市能达通用电气股份合作公司顾宏进、熊伍华、刘文斌经理，邵祖武、曹永红部长，周志军、李青茂工程师，研究生许汉平、张永刚、傅维圣、张兆云、贺志龙等为上述项目的顺利完成做出了贡献；刘永前、傅闯、余刃、王生铁博士提供了帮助。在此向所有帮助和支持过作者的人们致以诚挚的谢意。

本文是在我的爱人颜秋容的支持下顺利完成的，是她承担了几乎所有的家务劳动和教子的重任，使我能潜心工作和研究；是她经常与我讨论研究进展和安排，使本文如期完成。

再次感谢所有关心、帮助和支持作者的人们！

## 参考文献

- [1] Kondoh J, Ishii I, Yamaguchi, et al. Electrical Energy Storage Systems for Energy networks. *Energy Conversion & Management*, 2000, 41: 1863-1874.
- [2] 陆佑楣, 潘家铮. 抽水蓄能电站. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 夏松雨. 国外抽水蓄能电站的监视和经营情况. *水力发电*, 1995(8).
- [4] 威尔逊. 美国抽水蓄能电站. *水利水电快报*. 1997, 18 (24): 24-25.
- [5] 索丽生. 抽水蓄能电站的水力学专门问题—'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(二). *水利水电科技进展*. 1995, 15(2): 8-15.
- [6] 沈祖诒. 抽水蓄能电站的机组设备—'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(四). *水利水电科技进展*. 1995, 15(3): 1-6.
- [7] 方辉钦. 抽水蓄能电站的电气设备—'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(五). *水利水电科技进展*. 1995, 15(3): 7-12.
- [8] 梁见诚. 国外抽水蓄能电站监控. 北京: 水利电力部科学技术司, 1986.
- [9] 李惕先, 季云, 刘启钊. 抽水蓄能电站. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [10] 王海曙. 抽水蓄能电站综述. *水利水电科技进展*. 1998, 18(6): 21-25.
- [11] 宋毅. 论抽水蓄能电站的建设与发展前景. *华北电力技术*. 1999 (11): 11-15.
- [12] 林明华. 世界抽水蓄能电站建设特点与发展趋向. *水力发电学报*. 1996 (3): 87-98.
- [13] 雅各布 T. 21 世纪瑞士抽水蓄能展望. *水利水电快报*. 1998, 19 (7): 1-5.
- [14] 张永刚, 刘昌玉, 叶鲁卿. 一种计算抽水蓄能电站调峰填谷节煤效益的方法. *湖北水力发电*, 1997, (1): 54~56
- [15] 罗绍基. 我国抽水蓄能电站建设. *水力发电*. 1999 (4): 4-9.
- [16] 汪军, 方辉钦, 钟敦美等. 抽水蓄能电站计算机监控系统特殊性与设计要求. *电力系统自动化*. 2000, 24 (22): 49-51.
- [17] Cloud, Harvidson. Concepts and Features of the Automated Unit Control System for the Racoon Mountain Pumped-Storage Plant. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*. 1978, 97 (2).
- [18] Morie A T L, Rolie H. Foyers Pumped Storage Scheme. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*. 1979, 98 (5).
- [19] Bell G P, Yagbush H. Automation of Wehr Pumped-Storage Plant Using Process Computers. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*. 1981, 100 (1).
- [20] Chen Z P. The Design of Plant Supervision Control System and Protection System for Tianhuangping Project. In: *Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94*, 1994, Nanjing. 533-538.

- 
- [21] Fang H Q, Guo M Q, Wang J. Application of Open System in Monitor and Control of Pumped Storage Plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, 1994, Nanjing. 539-543.
- [22] 卢文秀, 褚福磊, 张正松. 抽水蓄能机组的状态监测和故障诊断. 中国电力, 2000, 33 (4): 19-22.
- [23] 刘昌玉, 叶鲁卿. 基于 ICMMS 的抽水蓄能调速器研究. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 38~41
- [24] 刑小平. 关于发展抽水蓄能电站几个认识问题的探讨. 水力发电, 1999 (2): 36~38
- [25] 沈祖诒. 水轮机调节 (第三版). 北京: 中国水利水电出版社, 1998
- [26] Ye L Q, et al. Multivariable Adaptive Control and How to Achieve It with a Microprocessor. In: Proceedings of the International Symposium on Applied Control and Identification. Copenhagen (Denmark), 1983. 20-25.
- [27] Murthy L D, et al. A digital Governor for Hydrogenerators. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1988, 3 (4): 780-784.
- [28] Jovanovic S, et al. Intelligent Adaptive Turbine Controller. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1988, 3 (1): 194-198.
- [29] Ye L Q, et al. Microprocessor-Based Adaptive Governor with Variable PID Parameters for Hydroelectric Generating Unit. In: Proceedings of Mini- and Micro-Computers and Their Applications. Bari (Italy), 1984. 241-244.
- [30] Ye L Q, et al. Variable Structure and Time-Varying Parameter Control for Hydroelectric Generating Unit. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1989, 4 (3): 293-299.
- [31] Malik O P, et al. An Intelligent Self-Improving Control Strategy with a Variable Structure and Time-Varying Parameters for Water Turbine. La Houille Blanche, 1989 (6): 463-475.
- [32] Ye L Q, et al. An Integral Criterion Appraising the Overall Quality of a Computer-Based Hydroturbine Generating System. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, 10 (2): 376-381.
- [33] Wozniak L, Daniel J B. Load-Level-Sensitive Governor for Speed Control of Hydrogenerators. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1988, 3 (1): 78-84.
- [34] Orelind G, et al. Optimal PID Gain Schedule for Hydrogenerators—Design and Application. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1989, 4 (3): 300-317.
- [35] Wozniak LA Graphical Approach to Hydrogenerator Governor Tuning. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1990, 5 (3): 417-422.
- [36] Vogt M A, et al. Output Error Identification of Hydrogenerator Conduit Dynamics. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1991, 6 (3): 329-335.
- [37] Lansberry J E, et al. Optimal Hydrogenerator Governor Tuning with a Genetic Algorithm. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1991, 6 (4): 623-630.
- [38] Herrbn J, Wozniak L. A State-Space Pressure and Speed Sensing Governor for Hydrogenerators. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1991, 6 (3): 414-425.
-

- [39] Lansberry J E, Wozniak L. Adaptive Hydrogenerator Governor Tuning with a Genetic Algorithm. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1994, 9 (1): 179-185.
- [40] Djukanovic M, et al. Neural-Net Based Coordinated Stabilizing Control for the Exciter and Governor Loops of Low Head Hydropower Plants. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, 10 (4): 760-767.
- [41] Schniter P, Wozniak L. Efficiency Based Optimal Control of Kaplan Hdrogenerators. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, 10 (2): 348-353.
- [42] Bonnert S C, Wozniak L. Adaptive Speed Control of Hdrogenerators by Recursive Least Squares Identification Algorithm. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, 10 (1): 162-168.
- [43] Throckmorton P J, Wozniak L. A Generic DSP-Based Real-Time Simulator with Application to Hydrogenerator Speed Controller Development. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1994, 9 (2): 238-242.
- [44] Trudnowski D J, Agee J C. Identifying a Hydraulic-Turbine Model from Measured Field Data. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, 10 (4): 768-773.
- [45] Wang Q G, Lee T H, Fung H W, et al. PID Tuning for Improved Performance. IEEE Trans. on Energy Conv., 1999, 7 (4): 457-465.
- [46] Jing L, Ye L Q, Malik O P, et al. An Intelligent Discontinuous Control Stragedy for Hydroelectric Generating Unit. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1998, 13 (1): 84-89.
- [47] 陈仲华. 水轮机电液控制系统技术发展述评. 水电厂自动化, 1997(2): 58~69
- [48] 陈仲华. 现代水轮机调速器的系统设计和配置的探讨. 电力系统自动化, 1990, 14(5): 3~11.
- [49] 陈仲华, 赵坤耀. 国产电液调速器性能浅析. 电力系统自动化, 1997, 21 (9): 61~65.
- [50] 王党生, 吴应文. 水轮机相角测量与控制. 华东电力, 1994 (11): 27-28.
- [51] 陈仲华. 论 PLC-步进式水轮机调速器适用性. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 45~48.
- [52] 刘昌玉, 傅维圣, 李朝晖等. PCC 步进式水轮机调速器. 华中科技大学学报, 2001, 29(4): 36~37.
- [53] 刘昌玉, 叶鲁卿, 马劲松等. 抽水蓄能调速器内嵌式测试子系统研究. 华中科技大学学报, 2001, 29(1): 51~52
- [54] 刘昌玉, 叶鲁卿, 马劲松. 一种新的频率相位测量方案. 水电能源科学, 2000, 18(4): 34~36
- [55] 刘昌玉, 魏守平. 智能测频测相模块的研究. 大电机技术, 1994 (6): 57~61
- [56] 刘昌玉, 魏守平, 周占勇等. 一种高可靠 PLC 水轮机调速器. 水电能源科学, 1995, 13(2): 83~87
- [57] 刘昌玉, 魏守平. 水轮机调速器的多调节模式及相互切换. 水电能源科学, 1994, 12 (4): 254~259
- [58] 刘昌玉, 申宇翔. 基于 STD 总线的微机调速器. 大电机技术, 1990 (1): 61~63
- [59] 刘昌玉, 傅维圣, 李朝晖等. 智能式水轮机调速器研究. 水电能源科学, 2001, 19(1): 66~



- 67
- [60] 许汉平, 刘昌玉, 叶鲁卿. 基于 IPC 的抽水蓄能机组调速器的研究. 湖北水力发电, 1997, (1): 33~37
- [61] 刘昌玉, 魏守平. 可编程序控制器在水轮发电机组调速系统中的应用. 自动化仪表, 1995, 16(4): 22~24
- [62] 任井利. WST-150PLC 调速器故障分析. 东北电力技术, 1999, (4): 42~44
- [63] 刘文斌, 杜波, 胡燕花. 水轮机调速器的运行与技术改造. 水力发电, 1999, (9): 58~60
- [64] 陈启卷, 王学武. 水轮机 PLC 调速器数字测频的研究. 大电机技术, 1994(4): 49~51
- [65] 张恩民. 瑞典调速机设计思想的剖析与评价. 测控技术, 1992 (1): 25~28.
- [66] 张瑞清, 卢建国. 浅析 HPC600 调速器存在问题与改进措施. 福建电力与电工, 1997, 17(3): 26~28.
- [67] 张晓宏, 南海鹏, 李云虹等. 步进式电液伺服系统的研究与试验. 西北水电, 1997 (2): 35~39.
- [68] 陈启卷, 王学武. 水轮机 PLC 调速器数字测频的研究. 大电机技术, 1994(4): 49~51
- [69] 李晃. 甩负荷后水轮机调速器调节时间. 大电机技术, 1998 (1): 56-59.
- [70] 刘建业, 郑玉林, 张炳达. 水轮机模糊调速器研究. 控制理论与应用, 1996, 13 (1): 47-51.
- [71] 蔡维由, 陈光大, 刘炳文. 水轮机调速器的极点配置法设计及自适应控制. 大电机技术, 1995 (6): 47-56.
- [72] 戴敏, 刘炳文, 蔡维由等. 具有不同引水管道的的水轮机调节系统数学模型. 武汉水利电力大学学报, 1997, 13 (2): 23-28.
- [73] 李朝晖, 叶鲁卿, 郭纪金等. 一种新型微机水轮机调速器的现场试验. 大电机技术, 1996 (2): 58-64.
- [74] Corsi S., Pozzi M., Tagliabue G. A New Real-Time Digital Simulator of the Turbine-Alternator-Grid System (STAR) for Control Apparatus Closed-Loop Tests. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 3, 1998: pp. 282~29
- [75] A.S. Mahajan. A proposed new speed governor. Journal of Materials Processing Technology, 82 (1998) 189-190
- [76] Luqing Ye, Weidong Li, Zhaohui Li, et al., "An Integral Criterion for Appraising the Overall Quality of a Computer-Based Hydro turbine Governing System," IEEE Trans. on Energy Conversion, 10(2), 1995: pp.376-381.
- [77] Zhaohui Li, N. Verge, D. Jaume, "A Highly Reliable Intelligent Control Strategy for Hydro Turbine Governing System," IEEE-SMC'96 Symposium on Control, Optimization and Supervision, Lille, France, 1996, pp. 587-592.
- [78] O. P. Malik, G. S. Hope, G. C. Hancock, et al. Frequency Measurement for Use with a Microprocessor-Based Water Turbine Governor. IEEE Trans. on Energy Conv., 1991, 6(3): 361~366
- [79] E. Swidenbank, M.D. Brown, D. Flynn. Self-tuning turbine generator control for power plant.

- Mechatronics, 9 (1999) 513-537.
- [80] Tripathy S C. Digital Governor for Use in Computer Control of a Generating Unit. *Energy Convers. Mgmt*, 1998, 39 (10): 973-983.
- [81] Nicolas J, Planque J L. Speed and Voltage Control Systems Acceptance Field Tests. *Conference Papers of Modeling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants - II*, Lausanne, Switzerland, July 1996, ISBN 0952264234: 429~442
- [82] 余刃, 叶鲁卿, 张永刚, 等. 智能控制-维护-技术管理集成系统 (ICMMS) 及其在电力系统中的应用: (一) ICMMS 的思想、组成及其特征. *电力系统自动化*, 1999, 23(23): 50-54
- [83] 余刃, 叶鲁卿, 张永刚, 等. 智能控制—维护—技术管理集成系统 (ICMMS) 及其在电力系统中的应用: (二) ICMMS 分析与设计的基本方法. *电力系统自动化*, 1999, 23(24)
- [84] 刘昌玉, 叶鲁卿, Iung B 等. 水轮机调速系统的预知维护. *武汉理工大学学报*, 2001, 23 (4): 45~47
- [85] 刘万景. 水电厂机组的状态监测. *水力发电*, 1999(9): 55-57
- [86] 周东华. 控制系统的故障检测与诊断技术. 北京: 清华大学出版社, 1994
- [87] 闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断和容错控制. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [88] Petin J F, Iung B, Morel G. Distributed Intelligent Actuation and Measurement (IAM) System within an Integrated Shop-Floor Organization. *Computers in Industry*, 1998 (37): 197-211.
- [89] Iung B., Morel G., "Issues and Trends towards Intelligent Maintenance Integrated Within the Enterprise", In: *Proceedings of the 2nd International IFAC/IFIP/IEEE conference on management and control of production and logistics MCPL'2000*, 5-8 July, Grenoble, France.
- [90] Morel G, Iung B, Galara D, et al. Prototyping a Sub-Concept of Computer Integrated Manufacturing Engineering: The Integrated Control, Maintenance and Technical Management System. *Intelligent Automation and Soft Computing, Proceedings of the First World Automation Congress*. High Technology Development Corporation, 1994, USA: 25-30.
- [91] Iung B, Leger J B, Morel G, et al. An Agent Oriented Architecture of an Intelligent Predictive Maintenance System. In: *The 5th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*. Gramado-RS (Brail): 1998. 217-223.
- [92] Iung B, Muhl E, Leger J B, et al. MAS Modeling Paradigm Application for the Development of a Proactive Maintenance Intelligent System. In: *MAS'99—1st IFAC Workshop on Multi-Agent Systems in Production*. Vienna (Austria): 1999. 89-95.
- [93] G. Morel, B. Iung. Balancing between Integration and Distribution Paradigms: the Modeling Process of the European CMMS-IAMS Projects. *Proceedings of the ICEIMT'97 Conference-Workshop 3*. Burnel, Belgium, 1997, 11~13
- [94] J. B. Leger, B. Iung, A. Ferro De Beca, J. Pinoteau. An Innovative Approach for New Distributed Maintenance System: Application to Hydro Power Plants of the REMAFEX Project. *Computers in Industry*, 38 (1999), pp. 131-148, ISSN 0166-3615
- [95] Leger J-B, Iung B. Methodological approach to Modeling of Degradation Detection and

- Failure Diagnosis in Complex Production Systems. In: Working papers of the 9th International Workshop on Principles of Diagnosis. Sea Crest Resort (USA): 1998. 209-216.
- [96] Banerjee A., Flynn B. B, "A simulation study of some maintenance policies in a group technology shop", *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No11, pp.1595-1609.
- [97] Mulcahy R., "The CMMS technology revolution - Why "Best-of-Breed" will still be best", *International Journal of maintenance and asset management*, Vol. 14, n°1, pp. 11-14, Feb-March 1999, ISSN 0952-2110.
- [98] C. Senior, A. Dore, T. Laengle, M. Albert, "An Architecture for Distributed Diagnosis Systems," 1st International IFAC Workshop on Multi-Agent-Systems in Production (MAS'99), Vienna, Austria, pp. 253-258.
- [99] Weston R. H., "Reconfigurable, Component-Based Systems and the Role of Enterprise Engineering Concepts", *Computers in Industry*, Vol. 40, pp. 2-3, November 1999.
- [100] S. Bussmann, "An Agent-Oriented Architecture for Holonic Manufacturing Control," *Proceedings of the 1st International IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS-EUROPE'98)*, Lausanne, Switzerland, pp. 1-12.
- [101] M. Sanz-Bobi, E. Sanchez-Ubeda, J. Villar, S. Revuelta, A. Kazi, "Multi-Agent Diagnosis Systems in Industry," 1st International IFAC Workshop on Multi-Agent-Systems in Production (MAS'99), Vienna, Austria, pp. 259-264.
- [102] L. Bongaerts, L. Monostori, D. McFarlane, B. Kadar, "Hierarchy in Distributed Shop Floor Control," *Proceedings of the 1st International IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS-EUROPE'98)*, Lausanne, Switzerland, pp. 97-113.
- [103] M. Schroeder, *Autonomous, Model-Based Diagnosis Agents*, Kluwer Academic Publisher, Boston/Dordrecht/London, 1998.
- [104] Ferreira G R, Pardo M X C, Vidal P J. Fault Detection and Isolation on Hybrid Systems by SFC. In: *INCOM'98--9th Symposium on Information Control in Manufacturing*. Nancy-Metz (France): 1998. 569-574.
- [105] Zhirabok A N. Diagnosis of Multiple Faults in Equipment Described by Nonlinear Models. In: *INCOM'98--9th Symposium on Information Control in Manufacturing*. Nancy-Metz (France): 1998. 547-550.
- [106] Zhang Y, Wang C, Sun X. Design and Implementation of a Multi-Agent Based Production Scheduling System. In: *MAS'99—1st IFAC Workshop on Multi-Agent Systems in Production*. Vienna (Austria): 1999. 37-41.
- [107] Pereira C E, Fohler G, Becher L B, et al. Applying Multi-Agent Systems to Real-Time Industrial Automation. In: *MAS'99—1st IFAC Workshop on Multi-Agent Systems in Production*. Vienna (Austria): 1999. 127-131.
- [108] Sanz-Bobi M A, Sanchez-Uberda E F, Villar J, et al. Multi-Agent Diagnosis Systems in Industry. In: *MAS'99—1st IFAC Workshop on Multi-Agent Systems in Production*. Vienna

- (Austria): 1999. 259-264.
- [109] Bongaerts L, Monistori L, McFarlane D, et al. Hierarchy in Distributed Shop Floor Control. In: Proceedings of the First International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. Lausanne (Switzerland): 1998. 97-113.
- [110] Kirsch D, Wieczorek D, Albayrak S. Open Agent Architecture for the Realization of Holonic Manufacturing Systems. In: Proceedings of the First International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. Lausanne (Switzerland): 1998. 407-415.
- [111] Yu D L, Gomm J B, Williams D. Sensor fault diagnosis in a chemical process via RBF neural networks. *Control Engineering Practice* 7 (1999): 49-55.
- [112] Patton R J. Robustness in Model-Based Fault Diagnosis: The 1995 Situation. *A. Rev. Control*, 1997, 21: 103-123
- [113] Cho K H, Lim J T. Failure Analysis and Diagnosis Using Discrete Event Models: Theory and Case Study. In: 4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. Seoul (Korea): 1997. 197-202.
- [114] Pik J. Incorrect Observation in Failure Diagnosis of Discrete Event Systems. In: 4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. Seoul (Korea): 1997. 203-206.
- [115] Lee K S, Park T G. A Fault Detection Isolation Observer Design by Hybrid Disturbance Decoupling Approach. In: 4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. Seoul (Korea): 1997. 197-202.
- [116] Zuzek A, Biasizzo A, Novak. Sequential Diagnosis Tool. *Microprocessors and Microsystems*, 2000, 24: 191-197.
- [117] W. Hu, A.G. Starr, A.Y.T. Leung. Two diagnostic models for PLC controlled flexible manufacturing systems. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999): 1979-1991
- [118] Coetzee J L. The Role of NHPP Models in the Practical Analysis of Maintenance Failure Data. *Reliability Engineering and System Safety*, 1997, 56: 161-168.
- [119] S.K. Yang, T.S. Liu. State estimation for predictive maintenance using Kalman filter. *Reliability Engineering and System Safety*, 66 (1999): 29-39.
- [120] Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Philippe Wolff. Predictive maintenance: The one-unit replacement model. *Int. J. Production Economics* 54 (1998): 285-295.
- [121] M. Bevilacqua, M. Braglia. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, 70 (2000): 71-83
- [122] C.Y. Teo, Wei Shen. Real-time generation and supervision of a dynamic restoration plan for bulk-power systems. *Electric Power Systems Research* 53 (2000) 113-122.
- [123] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996
- [124] 孙增圻, 张再兴. 智能控制的理论与技术. *控制与决策*, 1996, 11 (1): 1-8.
- [125] 沈建强, 李平. 神经模糊技术的研究现状与展望. *控制与决策*, 1996, 11 (5): 527-532.

- [126] 费敏锐, 陈伯时. 专家模糊控制方法. 控制与决策, 1996, 11 (2): 256-260.
- [127] 何 洪, 周恩涛, 孙 薇等. 滞后复杂系统的多步预测自学习模糊控制. 控制与决策, 1996, 11 (2): 300-303.
- [128] 隋清等. 一类专家模型参考自适应控制. 信息与控制, 1994, 23 (2): 86-93
- [129] 费敏锐等. 智能控制方法的交叉综合及其应用. 控制理论与应用, 1996, 13 (3): 273-280
- [130] 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其应用. 北京: 航空航天大学出版社, 1995
- [131] 王 云, 何利铨. 模糊-线性最优 HGPSS 原理. 贵州工业大学学报, 1998, 27 (4): 62-68.
- [132] 奥斯特隆姆 K J, 威顿马克 B. 自适应控制. 李清泉等译. 北京: 科学出版社, 1992.
- [133] 张天平, 冯纯伯. 一类非线性系统的输出反馈模糊控制, 控制与决策, 1996, 11 (5): 545-550.
- [134] P. Kallappa, Asok Ray. Fuzzy wide-range control of fossil power plants for life extension and robust performance. Automatica, 2000, 36: 69-82.
- [135] D.K. Chaturvedi, P.S. Satsangi, P.K. Kalra. Load frequency control: a generalised neural network approach. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21: 405-415.
- [136] David Angeli, Alessandro Casavola, Edoardo Mosca. Predictive PI-control of linear plants under positional and incremental input saturations. Automatica, 2000, 36: 1505-1516.
- [137] D. Das, S. K. Aditya, D.P. Kothari. Dynamics of diesel and wind turbine generators on an isolated power system. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21: 183-189
- [138] Cai H, Qu Z, Gan D, et al. A Comparison and Simulation Study of Nonlinearly Designed Robust Controllers for Power System Transient Stability. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22: 15-28.
- [139] Fu K S. Learning Control systems and Intelligent Control Systems: An Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control. IEEE Trans. Automatic Control, 1971, 67 (1): 70-72.
- [140] Saridis G N. Toward the Realization of Intelligent Control. Proc. of the IEEE, 1979, 67 (8): 1115-1133.
- [141] Antsaklis P J. Intelligent Learning Control, IEEE Control System, 1995, 15 (3): 5-8.
- [142] Foulloy L, et al. Toward Symbolic Process Control. Automatica, 1994, 30 (3).
- [143] Procyk T J, Mamdani E H. A Linguistic Self-Organizing Process Controller. Automatica, 1979, 15 (1): 15-30.
- [144] Lee C C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I. IEEE Trans. on Sys. Man and Cyb., 1990, 20 (2): 404-417.
- [145] Ting C S. An Approach to Systematic Design of the Fuzzy Control System. Fuzzy Sets and Systems, 1996, (77): 151-166.
- [146] Park D, et al. Genetic-Based New Fuzzy Reasoning Models with Application to Fuzzy Control. IEEE Trans. on Sys. Man and Cyb., 1994, 24 (1): 39-47.
- [147] Cao S G, et al. Stability Analysis of Fuzzy Control System. IEEE Trans. on Sys. Man and Cyb.,

- 1996, 26 (1): 201-224.
- [148] Yi S Y, Ching M J. Systematic Design and Stability Analysis of a Fuzzy Logic Controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, (72): 271-298.
- [149] Katch R, et al. Stability Analysis of Control System Having PD Type of Fuzzy Controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, (74): 321-334.
- [150] 黄柯隶, 张金槐, 李剑川等. 系统仿真技术. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [151] 吴重光. 仿真技术. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [152] 刘藻珍, 魏华梁. 系统仿真. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [153] 顾启泰. 系统设计与仿真. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [154] 冷伟, 房德山, 徐治. 火电机组仿真技术的应用及发展. *电力系统自动化*, 1999, 23(23)
- [155] 陈礼义, 顾强. 电力系统数字仿真及其发展. *电力系统自动化*, 1999, 23(23): 1~6
- [156] 但果. 仿真软件 PSpice 的应用. *电子技术*, 2000 (5): 52~53
- [157] 郑春龙. PSpice 在数模混合电路分析中的应用. *电子技术*, 1999 (12): 35~37
- [158] 冯继超. 电路模拟软件在电子电路中的辅助分析. *交通与计算机*, 2000 (1): 56~58
- [159] 杨晨, 钟晶亮, 常涛. 分布式控制系统可视化组态仿真软件开发. *系统仿真学报*, 1999, 11(4): 261~264
- [160] 李敬恒, 刘昌玉. 引入水压反馈减少调压室稳定断面. *水电能源科学*, 1990, 8 (3): 232~241
- [161] 李敬恒, 刘昌玉. 水电站水机电联合过渡过程数字仿真研究. *水电能源科学*, 1989, 7 (2): 113~119
- [162] 张兆云, 刘昌玉. 用 Protel 实现仿真-PCB 一体化设计. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2001(1): 33~36
- [163] 刘昌玉, 叶鲁卿, 马劲松等. 分布式面向环节的水轮机调节系统仿真. *大电机技术*, 2001(2): 64~66
- [164] 王亚刚, 邵惠鹤. 一种基于 InTouch、Visual C++和 Matlab 的控制软件实现. *计算机工程*, 1999; 5: 31~32
- [165] 高鹏, 安涛, 寇怀成. Protel99 入门与提高. 北京: 人民邮电出版社, 2000 年 1 月
- [166] 高俊斌. MATLAB 5.0 语言与程序设计. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998
- [167] 韩九强. MATLAB 高级语言及其在控制系统中的应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1997
- [168] Hydro-Quebec, Power System Blockset User's Guide, Ver. 1. The MathWorks Inc., 1999.
- [169] 周青龙. 故障诊断与监控. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [170] Advantech Co., Ltd. PC-Based Industrial Automation Solution Guide. Vol. 61, 1998
- [171] 张志明, 李蓉艳. 基于 PC 总线的高精度频率测量卡设计. *微型机与应用*, 1999(2): 20~22

## 附录 攻读博士学位期间撰写的主要论文

- [1] Liu Changyu, Iung Benoit, Ye Luqing, et al. An Intelligent Governor for Predictive Maintenance of Hydropower Plant. Accepted by Control Engineering Practice (IFAC Journal)
- [2] 刘昌玉, 叶鲁卿. 基于 ICMMS 的抽水蓄能调速器研究. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 38~41. 被《EI》收录 (EIP00085288142)
- [3] 刘昌玉, 叶鲁卿, 马劲松等. 分布式面向环节的水轮机调节系统仿真. 大电机技术, 2001(2): 64~66
- [4] 刘昌玉, 叶鲁卿, 马劲松等. 抽水蓄能调速器内嵌式测试子系统研究. 华中科技大学学报, 2001, 29(1): 51~52
- [5] 刘昌玉, 叶鲁卿, Iung B 等. 水轮机调速系统的预知维护. 武汉理工大学学报, 2001, 23(4): 45~47
- [6] 刘昌玉, 叶鲁卿, 马劲松. 一种新的频率相位测量方案. 水电能源科学, 2000, 18(4): 34~36
- [7] 刘昌玉, 傅维圣, 李朝晖等. PCC 步进式水轮机调速器. 华中科技大学学报, 2001, 29(4): 36~37
- [8] 许汉平, 刘昌玉, 叶鲁卿. 基于 IPC 的抽水蓄能机组调速器的研究. 湖北水力发电, 1997, (1): 33~37
- [9] 张永刚, 刘昌玉, 叶鲁卿. 一种计算抽水蓄能电站调峰填谷节煤效益的方法. 湖北水力发电, 1997, (1): 54~56
- [10] 刘昌玉, 张兆云, 朱义军等. RSView32 和 C++ Builder 应用软件的实时信息交换. 计算机工程与应用, 2001, 37(7): 103~106
- [11] 刘昌玉, 常黎, 聂凯等. 新型电子导管控制器研究. 华中理工大学学报, 1999, 27(5): 38~40
- [12] 刘伟, 刘昌玉, 朱义军等. 水电站弧门监控系统研制. 水电能源科学, 2001, 19(1): 68~69
- [13] 张兆云, 刘昌玉. 用 Protel 实现仿真-PCB 一体化设计. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2001(1): 33~36
- [14] 刘伟, 刘昌玉. 水能资源在西部开发战略中的作用分析. 水电能源科学, 2000, 18(3): 54~56
- [15] 张兆云, 刘昌玉, 朱义军等. 组态软件在水电站弧门监控系统的应用. 人民长江, 2001, 32(5): 37~38
- [16] 刘昌玉, 傅维圣, 李朝晖等. 智能式水轮机调速器研究. 水电能源科学, 2001, 19(1): 66~67