

水轮机调速器控制策略研究综述

王玲花¹, 沈祖诒¹, 陈德新²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450045)

摘要:综述水轮机调速器 PID 控制、智能控制和自适应控制等特点, 指出模糊控制可解决非线性控制系统问题, 但导致控制精度降低; 神经网络控制虽有在线学习能力, 但存在着学习速度较慢、易收敛到局部最小点等不足, 延长了网络决策时间; 将模糊控制、神经网络控制和 PID 控制相结合, 可以实现 PID 控制器参数在线调整, 能够直接用于水轮机调节系统的实时控制中; 状态反馈控制可以改进控制系统的动态性能; 遗传算法可有效地解决参数寻优问题。提出在调节参数最佳整定、电液随动系统、可靠性与稳定性等方面还有待深入研究。

关键词:水轮机; 调速器; 控制策略

中图分类号:TV734.4

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)02-0056-03

水轮机调速器是保证水电厂机组稳定运行的重要控制设备, 直接关系到机组的安全与稳定运行。早期的水轮机调速器是利用测速元件直接操作水轮机执行机构的直接作用式小型调速器, 19 世纪末出现了用液压元件进行功率放大的液压调速器, 至 20 世纪 30 年代已有相当完善的机械液压型调速器。随着电力系统的发展, 对自动化的要求越来越高, 如要求进行机组的成组调节与控制等, 1944 年世界上第一台电气液压型调速器在瑞士问世。电气液压型调速器经历了电子管、晶体管、集成电路等发展阶段, 调节规律由比例积分型 (PI) 发展到比例积分、微分型 (PID)。由于计算机技术的发展, 结合经典、现代及智能等控制理论, 20 年来世界各国先后将微机技术引入水轮机调节领域。

我国的大、中型水轮机调速器在 20 世纪 50 至 60 年代大部分是机械液压型; 70 至 80 年代初则较多采用电子管、晶体管和集成电路的模拟电气液压型调速器, 调节规律大都为 PI 型; 自 80 年代初, 我国开始研制微机调速器; 进入 90 年代, 在我国新建或更新改造的大、中型水电站中, 已普遍采用微机调速器。因机械液压型调速器的结构简单, 对油质要求不高, 能够提供必要的稳定调节作用, 目前在国内的一些中小型水电站中仍有部分应用, 其不足之处是死区大, 灵敏度低, 事故甩负荷时易过速。电气液压型调速器反应速度较快, 但由于它对油质、油压要求较高, 电液转换器易卡, 机械液压型和模拟电气液压

型调速器漏油多, 压油泵频繁启动, 可靠性降低, 将逐渐被淘汰。微机调速器调节规律由 PID 型发展到多种 PID 改进型, 其发展经历了 Z80 单板机、单片机、STD 总线、可编程、工业 PC 等微机系列的应用过程, 而单板机、单片机型逐渐被淘汰, 占据市场的主要是 STD 总线和 PLC 机型, 但目前的微机调速器亦存在一些不足, 如对电磁干扰十分敏感等。由于在水轮机微机调速器中广泛采用电子技术、液压技术、自动控制技术和计算机技术, 出现了多种新型的控制策略, 使现代水轮机调速器的机型结构简单、稳定性好、可靠性和主要技术指标大为提高, 抗干扰性强, 控制功能不断扩展和完善, 不但容易实现自动开停机, 频率、相位、功率自动跟踪, 而且容易实现调节器的变结构、变参数控制, 使水轮机调节系统在各工况下均具有良好的控制性能, 以满足水电厂计算机自动监控的要求。

近年来, 研究探讨较多的是水轮机调速器的控制策略^[1-3], 从定参数 PI, PID, 有级变参数 PID, 发展到微机调速器时代连续变参数适应式 PID, 以及自适应变结构时变参数自完善控制、模型参考多变量最优控制、最优 PID 控制、人工神经网络控制、预测控制及基因控制等新型控制策略。这些控制策略都是以经典 PID 控制为基础加以改进的, 在理论研究和工程实践中对调速器的发展均起着积极的推动作用。

作者简介:王玲花(1965—), 女, 河南唐河人, 讲师, 博士研究生, 主要从事水力机组及过渡过程控制研究。

1 常规 PID 型调节规律

自 1922 年美国诺尔斯基提出 PID 调节器以来,由于其结构简单,对模型误差具有鲁棒性,易于操作,参数易于调节,至今仍是生产过程自动化中使用最多的一种调节器(在全世界范围内,过程控制中 PID 调节器占 84%,若考虑改进型则超过 90%),大多数反馈控制系统用该方法或其较小的变形来控制,因此 PID 控制是水轮机调节系统的一种比较理想的控制方式。PID 控制(以并联 PID 为例)是按偏差的比例、积分和微分线性组合进行控制的方式。比例控制在偏差出现时,立即能给出控制信号,使被控制量朝着减小偏差的方向变化,比例控制信号较积分控制信号快,但在偏差很小时,控制信号也很小,调节过程较慢,控制作用的强弱取决于比例系数 K_p ,对于具有自平衡性的被控对象存在静差,加大 K_p 可以减小静差,但 K_p 过大时,会导致动态性能变坏,甚至会使闭环系统不稳定;积分控制对偏差进行记忆并积分,可以防止小偏差长期存在,有利于消除静差,但在偏差出现初期,偏差比较小,此时无论是比例控制还是积分控制作用都比较小,速动性差,具有滞后特性,积分作用太强会使控制的动态性能变差,以至于使系统不稳定;微分控制信号反映偏差变化速度,敏感偏差的变化趋势,在偏差刚形成时,就能有较大的控制作用,从而加快调节过程,增大微分控制作用可加快系统响应,使超调量减小,增加系统稳定性,其缺点是对于干扰敏感,使系统抑制干扰能力降低。根据不同被控对象适当地整定 PID 的 3 个参数,可以获得比较满意的控制效果。实践证明,这种整定参数的过程,实际上是对比例、积分、微分三部分控制作用的综合。常规 PID 控制无法解决稳定性与减小偏差之间的矛盾,加大控制作用可使偏差减小,但是降低了稳定性;反之,为保证稳定性,限制控制作用,这样又降低了控制的精度。即使对被控对象整定了一组满意的 PID 控制参数,当对象特性发生变化时,也难以保持良好的控制性能。当过程的随机、时滞、时变和非线性等特性比较明显时,采用常规 PID 调节器很难收到良好的控制效果,甚至无法达到基本要求。因此,要保证在各种工况下均能优化运行,必须采用在线自整定技术,基于专家式 PID 自整定和模糊 PID 自整定方法已显示出良好的应用前景。

2 智能控制策略

古典和现代控制理论均要求预先知道被控对象的数学模型,但实际上许多对象具有复杂的不确定

性、时变性和非线性,对此尚无成熟的、系统的辨识理论和方法,要实行有效的实时控制很困难。水轮机调节系统是一个典型的高阶、时变、非最小相位系统,而且又是一个参数随工况点改变而变化的非线性系统,在系统动态过程及暂态过程中,对于比例、积分、微分控制作用的要求是不同的,应根据系统的动态特征和行为,采取灵活控制方式,如采取变增益、非线性积分、智能采样等多种途径。智能控制理论的发展为解决这些问题提供了可能。

智能控制是控制理论、人工智能、运筹学和系统理论四学科的交叉。随着 Zadeh 模糊集理论的发展及 1982 年 John Hopfield 提出的 HNN 模型,给智能控制不断注入了新思想、新方法和新内容。常规的 PID 控制与智能控制相结合,出现了许多改进的 PID 智能控制器。1995 年华中理工大学等单位联合研制的高可靠智能微机调速器,在国内外首次实现了调速器参数自优化和机组智能开机等功能。

2.1 模糊控制

模糊控制是智能控制较早的形式,不需要精确的数学模型,对于处理非线性时变参数一类控制问题具有良好的控制效果,但它对信息简单、模糊的处理将导致系统控制精度的降低和动态品质变差。传统的模糊控制已改进了许多,出现了多种形式,如模糊模型及辨识^[4]、模糊自适应控制,并在稳定性分析^[5]、鲁棒性设计等方面取得了进展。水轮机模糊调速器是一种决策速度快、符合实时控制要求的有效控制仪器,水轮机模糊-双积分并联变结构复合控制器^[6]克服了一般模糊控制存在较大静差的缺陷。模糊控制相对于常规 PID 控制调节性能更具有适应性,常规 PID 控制器很难在减小“反调”、加快调节速度和减小“超调”之间达到比较理想的效果,将模糊决策理论和 PID 控制相结合,改进后的水轮机 PID 型模糊控制器,由于加入微分作用和采用变宽度的隶属度函数^[7],其调节性能更好。模糊控制本身具有一定的鲁棒性,但也较难直接用于在调节过程中结构和参数变化范围较大的水轮机调节系统,若使模糊控制器具有学习能力,自动调整自身的规则、参数,是可以完成各种工况下的控制任务的。

2.2 人工神经网络控制

人工神经网络之所以能在控制领域中得到应用,是因为它具有近似表示任意非线性函数及其逆的能力;通过离线和在线两方面的权重自适应提供不确定系统自适应和自学习的功能;可提供大规模动力系统允许快速处理的并行分布处理结构;网络自身有容错性和联想功能,提供鲁棒性强的结构。神经网络用于控制有两种方法,即用来实现模型

和直接作为控制器使用,对于水轮机调节系统则采用后者.神经网络控制的结构和控制机理已有多人进行过讨论、研究和总结,通过对神经网络 PID 控制算法的改进,增强了 PID 控制器自寻优的能力.神经网络的不足主要是学习速度较慢,易收敛到局部最小点,神经元激励函数计算复杂,延长了网络的决策时间,不宜直接用于水轮机调节系统对实时性要求高的控制.将模糊控制、神经网络控制和 PID 控制相结合^[8],在大偏差范围内采用模糊控制,在小偏差范围内转换成 PID 控制,既具有模糊控制简单有效的非线性控制作用,又具有神经网络的自学习能力,同时也具有 PID 控制的精确性,可以实现 PID 控制器参数在线调整^[9],能够直接用于水轮机调节系统的实时控制.模糊控制和神经网络技术有较强的互补性,将两者结合用于 PID 控制也是一个发展方向.把递归最小二乘法用于神经网络可加快学习过程^[10],水轮机调节系统有多种改进的人工神经网络控制方法^[11,12],而有关控制的稳定性还需做深入探讨,神经网络控制已交叉渗透到各种控制理论中,使一些发展缓慢的控制理论又具有了活力.

3 自适应控制策略

自适应控制系统是一个本质非线性的系统,对于控制对象特性或扰动特性变化范围很大同时又要求经常保持高性能指标的系统,采用自适应控制是适宜的.将自适应控制技术引入发电机组的控制始于 20 世纪 80 年代初,Cheetham 提出了一种自校正电压调节器, Malik 和 Hope 研究了汽轮机的自适应调速器.我国学者在水轮机调速器方面进行了模型参考自适应控制及转速自适应控制的研究^[13,14],提出了一种基于测试系统频率特性的自适应控制策略^[15],按改进的极点配置法设计的调速器能较好地兼顾频率扰动和负荷扰动^[16,17],将二次型性能指标引入单神经元并利用自学习功能构成了自适应 PID 控制器^[18],从而实现水轮机自适应 PID 最优控制.但这种控制策略在仿真方面研究得多,而实际应用得少,原因是自适应控制理论进展较慢,其稳定性、收敛性、鲁棒性的研究仍有许多关键问题有待深入,同时水轮机调节系统又是一个复杂的动力系统.

4 其它一些控制策略

水轮机调速器的参数整定一般以单机带孤立负荷的数学模型为基础,实际上大多数水电机组是并网运行的,对并网机组建立并网运行水轮机调节系统的数学模型来确定水轮机调速器参数更符合实际,使用状态反馈控制可以改进系统动态性能^[19].

遗传算法是一种模拟自然进化而提出的简单高效的优化组合算法,是建立在自然遗传学机理基础上的参数搜索方法,最基本的操作有复制、交叉、变异,它不需求梯度,能得到全局最优解,将遗传算法用于水轮机 PID 调节器参数寻优^[20],使系统在任何状态下都能得到比传统 PID 更好的控制效果,更强的鲁棒性,遗传算法为调节器的设计提供了一个新的途径.

5 结 语

针对巨型水电机组调速器的研制,在系统结构、开发语言、液压执行机构、制造工艺和安装水平、检验和测试、维护和发展等方面还有待进一步研究.水轮机调节系统中的水、机、电联系复杂,虽然我国在理论研究和工程实践方面做了许多工作,但与国际先进水平还有差距,仍有许多问题需要深入研究:调节参数的最佳整定,调节规律的研究,电液随动系统可靠性与稳定性的研究,中小型电站的更新改造,大、巨型机组的研制、投产等.

参考文献:

- [1] Ye Luqing. Model reference multivariable optimal control and its realization with a microprocessor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(3): 237 ~ 240.
- [2] Ye Luqing, Wei Shouping. Variable structure and time-varying parameter control for hydroelectric generating unit[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(3): 293 ~ 297.
- [3] Orelind G. Optimal PID gain schedule for hydrogenerators-design and application[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(3): 300 ~ 307.
- [4] Tan S H, Yu Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems[J]. Automatica, 1996, 32(4): 637 ~ 643.
- [5] Buckley J J. Universal fuzzy controllers[J]. Automatica, 1992, 28(6): 1245 ~ 1248.
- [6] 刘建业, 郑玉森, 张炳达. 水轮机模糊调速器研究[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(1): 47 ~ 51.
- [7] 王印松, 商国才. 一种适用于非最小相位系统的模糊控制方法[J]. 控制与决策, 1999, 14(1): 51 ~ 55.
- [8] 潘永湘, 刘兴伟. 基于神经网络逆模型的 Fuzzy-PID 控制方法及其应用研究[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(3): 42 ~ 45.
- [9] 景雷, 叶鲁卿, 周泰经. 基于在线学习的水轮发电机组智能控制系统研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 21 ~ 26.
- [10] 王耀南, 彭建春, 王辉. 基于高斯基神经网络的自学习控制及应用[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(5): 701 ~ 707.
- [11] 王印松, 刘长青, 商国才, 等. 水轮机调节系统的神经网络控制[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(1): 56 ~ 61.

(下转第 62 页)

国内已经研制成功的超磁致伸缩地面声波发射器制作声波发射阵,将能量聚焦于地下某一深度,并且可变深聚焦,研制 B 型声波三维扫描成像系统,来探测堤坝隐患,但该系统的缺点是其发射探头阵必须与地面耦合好,否则能量传不下去。

4 放射性探测技术

放射性探测技术中同位素示踪技术是探测堤坝管涌及管涌渗透性的一种有效的方法,江苏省农业科学研究院原子能研究所及河海大学在这方面作了许多研究和生产实践工作^[6]。

管涌探测主要依据管涌发生时相伴的各种物理场、化学场的变化进行的,洪水期高水位时,沿堤坝后所有堤段地下水都是江河水补给,很难通过测定地层中的强度、电导率、pH 值等参数判定渗漏情况,且堤段也不能进行钻孔验证;枯水期低水位时,地下水一般补给江河水,只有少数渗透性较强的堤段,江河水通过强透水层入侵到堤坝后,江河水入侵的范围与渗透性成正比关系,通过天然示踪方法测出地下水中的强度、电导率、pH 值等参数,然后利用同位素示踪单孔稀释法测定各地层渗透流速,利用同位素示踪单孔测定水平流向,利用同位素示踪测定注水和不注水条件下垂向流,进而确定堤坝管涌及管涌区渗透性,江苏省农业科学研究院原子能研究所研制的一种智能地下水动态参数测量仪,能较好地地在天然流场下的单井中测量地下水的各种渗透特性,近期,利用该方法及上述仪器设备,在黄河下游截渗墙施工质量的检测中取得了较好的成果。

5 流场法探测技术

流场法是中南大学何聚善院士、汤井田教授^[7]等提出的一种测渗漏的新方法,流场法的核心技术是用电磁场、弹性波场等去拟合渗、漏的水流场,测

量场的密度向量,场的密度向量分布与渗、漏水场的水流密度向量相一致,集中指向渗漏水入口,他们的研究表明,将探头放至水底,测量水底的流场密度向量分布,其横向分辨率最高,定位度会更好,他们用自己研制的仪器设备对浏阳株树桥水库进行探测,取得了较好的效果。

6 结 语

经过数十年广大科技工作者的努力,我国堤坝隐患及渗漏探测技术取得了很大的进展,今后,堤坝管理单位、建设单位及各科研院所、生产单位检测技术人员应精诚合作,联合攻关,加强堤坝隐患及渗漏快速无损探测的基础理论研究和高新技术系统的研究与开发(堤坝渗透破坏险情船载(或专用车载)预警、报警系统),加快建立 GIS 堤防运行管理智能数据库和堤防安全性评价专家系统的研究,据此,堤坝隐患及渗漏探测技术才有可能更快地发展,满足我国堤坝管理工作的需要。

参考文献:

- [1] 肖柏勋,等.工程地球物理勘探最新研究进展及技术应用[J].水利水电快报,1999(20):1~8.
- [2] 房纯刚.瞬变电磁法探测堤防渗漏隐患[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].南昌,1999.
- [3] 房纯刚.大地电导率仪探测堤防渗漏隐患[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].南昌,1999.
- [4] 吴相安,等.水利隐患 GPR 探测技术研究[J].地质与勘探,1998,34(3):47~51.
- [5] 田世场.综合物探在堤防隐患探测中的应用[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].郑州,2000.
- [6] 杜国平.同位素示踪技术在堤防隐患探测中的应用[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].郑州,2000.
- [7] 汤井田.流场法探测堤坝渗漏隐患研究[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].郑州,2000.

(收稿日期:2000-10-30 编辑:马敏峰)

(上接第 58 页)

- [12] 郭创新,梁年生,叶鲁卿,等.水轮机智能 PID 调节[J].大电机技术,1997(5):56~60.
- [13] 王伯林.水轮发电机组的模型参考自适应控制[J].自动化学报,1987,13(6):408~415.
- [14] 王伯林.水轮发电机组转速自适应控制[J].水力发电学报,1989,(4):41~48.
- [15] 陈光大,刘炳文,蔡维由,等.基于测试系统频率的自适应水轮机调速器[J].水力发电学报,1993,(2):37~45.
- [16] 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[J].大电机技术,1995,(6):47~56.
- [17] 孟佐宏,蔡维由,陈光大,等.水轮机调节系统最优鲁棒极点配置调速器的设计[J].大电机技术,2000,(4):60~64.
- [18] 徐中,孙伟,刘晓冰.单神经元自适应 PID 控制器的研究[J].大连理工大学学报,1999,39(5):667~672.
- [19] 沈祖诒,黄宪培.通过长输电线与电网并列运行水轮机的控制[J].水力发电学报,1989,(3):77~86.
- [20] 刘乐星,毛宗源.水轮机的 GA-PID 控制器研究[J].电力系统自动化,1997,21(12):41~43.

(收稿日期:2000-11-13 编辑:张志琴)