

文章编号: 1001-5485(2007) 05-0079-05

我国水轮机调速技术最新进展与展望

潘熙和, 贾宝良, 吴应文

(长江科学院 长江控制设备研究所, 武汉 430010)

摘要:通过分析国内水轮机调速器研制生产厂家的最新调速器技术水平,从调速器的系统结构模式、以工业控制计算机构成的微机调节器、计算机双机冗余问题、友善且内容丰实的人机界面、调速器的计算机仿真测试功能、采用工业标准液压件如比例伺服阀或伺服电机构成的电液转换部件、机械反馈和机械开度限制机构的设置、普遍提高的调速器油压等级等方面进行了总结。结果表明:我国水轮机微机调速器产品的主要技术指标都达到了国家技术标准的要求,部分厂商的产品技术指标达到了国际先进水平。同时,从“努力贯彻有关水轮机调速器各类标准”等5个方面提出了我国水轮机调速技术的努力目标。

关键词:水轮机调速器; 系统结构; 工业控制计算机; 工业标准液压件; 随动系统

中图分类号: TK 730. 41

文献标识码: A

近十多年来,在中国大陆水轮机调节行业中,广泛运用微型计算机技术、机电一体化技术和现代液压技术的新成果,并将其他工业部门一些先进的技术成果移植到了水轮机调节技术中来。各专业制造公司、科研开发单位,在激烈的市场竞争中,不断推出调速器新品种,使我国目前的水轮机调节技术达到一个新的水平。水轮机微机调速器产品的主要技术指标一般都能达到国家技术标准的要求,部分产品技术指标达到了国际先进水平,较好地满足了我国水电建设事业发展的要求。目前,除非技术因素的调速控制设备还需要从国外进口外,混流式、轴流转桨式、贯流式、冲击式水轮机组所需配套的调速器都能由国内生产,三峡工程右岸电站水轮机控制设备实现国内采购就是一个标志。国内调速器生产厂家还与国际知名的调速器生产厂家配套生产微机调速器,并且国产化的水电控制设备已能配套出口到国外,参与国际竞争。我国水轮机调节行业技术取得了巨大的进步,整体技术水平达到了国际先进水平,已完全能满足我国国家水电能源发展的需求。

1 水轮机调节行业技术进步主要表现

我国水轮机调节技术和水轮机微机调速器技术进步主要表现内容是:

(1) 采用国际知名品牌的工业控制机(IPC)、可编程控制器(PLC)或可编程计算机(PCC)作调速器电气柜硬件核心,使我国调速器电气柜的质量、工艺

水平及可靠性达到国际先进水平。

(2) 大中型机组的调速器大多采用了微机调节器加电液随动系统的结构模式,提高了调速器动态和静态技术性能指标。

(3) 近几年来,在微机调速器中开始采用工业标准液压件,例如采用电液比例阀作调速器电液转换部件,采用逻辑插装阀作油泵组合阀、分段关闭装置、油压截止阀等,结束了水轮机调节技术长期游离于现代液压技术之外,以致制约了液压新技术在调速器中应用的不正常局面。

(4) 采用数控机床中成熟的步进电机、交流伺服电机和直流伺服电机作调速器的电/机转换部件,构成具有我国自主知识产权的用伺服电机控制的水轮机微机调速器新品种,这类调速器具有很强的抗油污能力,结构简单,可靠性高,特别适合油质清洁度难以保证和管理水平不高的水电站使用。

(5) 调速器工作油压普遍提高,大型水轮机调速器采用4.0 MPa和6.3 MPa,部分中小型水轮机调速器工作油压提高到14~16 MPa,并且采用皮囊式蓄能器。

(6) 微型计算机具有强大的运算、记忆、逻辑判断能力和通讯功能,因而微机调速器可以实现许多先进的功能,目前已将与上位机通讯、频率跟踪、电气开度限制,人工失灵区,故障诊断及处理列为必须实现的功能。大多数微机调速器设有手自动无条件与无扰动切换、离线诊断与维护 and 计算机辅助试验功能。除此以外,现代微机调速器还可以实现事故

收稿日期: 2007-06-25

作者简介: 潘熙和(1965-),男,湖北阳新人,教授级高级工程师,主要从事电站控制设备的研究。(电话) 027-82613093, 13339993921(电子

信箱) panxih@sinac.com.cn © 1994-2007, China Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数据记录功能, 防错、容错控制功能, 死区和零点漂移的动态补偿等先进的功能。

(7) 近年来, 由于用交流伺服电机和步进电机的电/机转换部件被不断完善, 实现了失电后自动复中的功能。

(8) 采用触摸式高分辨率的彩色显示屏作人机交互界面, 界面友善、内容丰实, 便于对调速器的状态监视、参数修改、试验曲线显示等。

(9) 我国具有自主知识产权的水轮机调速器试验用实时仿真系统研制成功并得到普遍应用, 该仿真系统可以在调速系统生产的试验室阶段和现场蜗壳充水前对调速器进行全面检查试验。

(10) 积极参加国际电工委员关于水轮机调速器标准的制订和讨论工作, 提出有价值的建议和意见, 引起国际同行的关注, 制定了十余种有关水轮机调速器的国家标准、行业标准, 在技术标准上较好地实现国际接轨。

2 需要关注的问题

水轮机调节技术取得长足的进步, 微机调速器产品不断推陈出新, 出现了“百花齐放, 百家争鸣”的大好局面。由于不同的用户对水轮机调速器的要求不尽相同, 因而对当前微机调速器的发展方向也会产生不同的意见和看法, 如下几条为大家所共同关注。

2.1 具有一级和二级电液随动系统的微机调速器的比较

当今国内外微机调速器的系统结构模式归纳起来大多属于微机调节器加一级电液随动系统和微机调节器加二级随动系统的结构模式, 后者也被称之为具有中间接力器的结构模式。两种结构模式的系统结构框图如图 1 和图 2 所示。

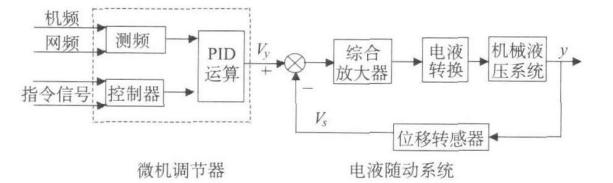


图 1 微机调节器+ 电液随动系统的调速器系统结构框图

Fig. 1 Governing system structure's block diagram of microcomputer regulator+ electrohydraulic following system

仅具有一级电液随动系统结构模式的调速器, 其转速死区计算公式为

$$i_{x_1} = b_p i_{a_0}$$

式中: b_p 为调速器永态转差系数; i_a 为电液随动系统的不准确度。

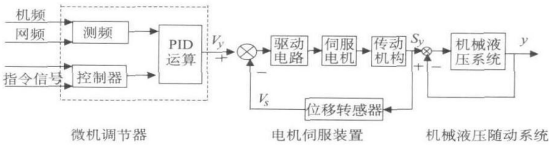


图 2 微机调节器+ 电机伺服装置+ 机械液压随动系统的系统结构框图

Fig. 2 System structure's block diagram of microcomputer regulator+ motor servomechanism + mechanohydraulic following system

由于电液随动系统放大系数可以调节, 系统的稳定性可以用电气或软件方法校正, 因此一般电液随动系统的随动系统不准确度容易做到 0.3% ~ 0.5%, 甚至更小, 当 b_p 为 6% 时, 仅有一级电液随动系统的结构模式的调速器的转速死区 i_x 很容易达到 0.02% ~ 0.04% 甚至更好的水平。

电液随动系统导叶位置采用电气反馈, 不需要装设机械位置的反馈, 因此, 这类结构模式的调速器在电站布置十分方便, 尤其是大型水轮发电机组和一些不便于安装机械反馈的特殊调速器适合采用这类结构的调速器。这类结构模式的调速器静态和动态特性指标较好, 机构简单, 在电站布置方便, 所以成为大中型水电站调速器的首选方案。

微机调节器加两级随动系统结构模式的调速器, 一般由 3 大部分组成: 微机调节器(或微机控制器), 电机伺服装置(或中间接力器)和机械液压随动系统。在我国这类结构模式的调速器, 多用伺服电机或步进电机构成的电机伺服装置作为电气-机械位移的转换部件, 也是前级随动系统。在国外一般用电液伺服阀或比例电磁阀和中间接力器构成的电液随动系统, 作为该调速器电气-机械位移的转换部件。末级都是机械液压随动系统, 这类结构模式的调速器的弊病是机械液压随动系统导叶位置必须采用机械位置反馈。当反馈链长, 传递路径曲折时, 不宜采用这类结构模式的调速器, 但是如果将调速器的机械液压柜布置于水机层的接力器附近时, 反馈链缩短, 这类调速器也能显现其独特的优势, 所谓座式调速器都布置于接力器附近, 国外比较流行。我国葛洲坝电厂 21 台水轮发电机组都是采用的这类系统结构模式的调速器, 调整、试验和维护方便, 深受电厂欢迎。另外, 我国中小型调速器大多是组合式, 即调速器的机械液压部分和接力器组合在一起, 得到接力器位置反馈十分方便, 采用这类结构模式是合理的。应该指出由于这类调速器具有接力器位置的机械反馈, 其手动操作系统具有接力器位移反馈的闭环系统。这种手动操作可靠, 手动时也不

溜负荷,这一特点倍受大型机组和重要的水电站重视。

具有两级随动系统结构模式的调速器转速死区 i_{x_2} 较仅有一级随动系统调速器转速死区 i_{x_1} 为大。

转速死区 i_{x_2} 的计算公式为

$$i_{x_2} = b_p(i_{a_1} + i_{a_2}),$$

式中: b_p 为调速器永态转差系数; i_{a_1} 为前一级随动系统的不准确度; i_{a_2} 为末级机械液压随动系统的不准确度。

一般情况下, $i_{a_1} \ll i_{a_2}$, 可以忽略不计。 i_{a_2} 是机械液压随动的不准确度。降低 i_{a_2} 主要途径是增大输入杆件的传动比和减小主配压阀的搭叠量。所以一般机械液压随动系统的不准确度 i_{a_2} 都要比电液随动系统的不准确度大。通过精心设计和加工制造,机械液压随动系统的不准确度 i_{a_2} 可以达到 0.5% 的水平。因此,这类调速器的转速死区 i_{x_2} 可以达到国家调速器标准的要求。

2.2 伺服电机和比例阀及工业标准液压件的应用

由于电液转换器抗油污能力差,故障率高的原因,迫使我国水轮机调节的工程技术人员寻求抗油污能力强、可靠性高的电/液或电/机转换部件。20 世纪末,能达公司研制的采用步进电机控制的调速器投运成功,并通过省部级鉴定,推动了我国采用步进电机、伺服电机控制的微机调速器的发展,国内大多数调速器专业厂商都开发出了用伺服电机控制的微机(或可编程)调速器,不到十年的时间,这类调速器已生产千余台套,形成了具有我国自主知识产权的一类调速器。近年来,大家解决了电/机转换部件失电时自动复中的难题,使用伺服电机或步进电机的电/机转换部件用于一级电液随动系统才真正获得成功。采用具有自动复中功能的伺服电机控制式调速器,其结构简单可靠技术先进,深受用户欢迎,目前国内已成为一种主流机型。

就在我国采用伺服电机(含步进电机)控制的微机调速器蓬勃发展时,国外调速器主要厂商都用电液比例阀或电磁比例阀作微机调速器转换部件。我国也有部分专业生产厂成功地应用了比例阀。不少调速器选型的用户不约而同地发出疑问,为什么国外调速器制造厂不用步进电机和伺服电机作调速器转换部件呢?还怀疑用伺服电机和步进电机的调速器速动性满足不了水轮机控制的要求。长期工作在水轮机调节行业的技术人员都知道,我国在 20 世纪 80 年代曾采用进口的电液伺服阀做调速器转换部件进行过深入研究,但都以失败告终,究其原因,是

因为调速器用油的清洁度得不到保证所致。加上我国液压装置上都没有对油液精细过滤的处理系统,大多中小电站受管理水平限制,油质清洁度很难得到保证。为此,微机调速器的研究开发人员在寻求抗油污能力强的电/机转换部件,而数控机床驱动机构中应用成熟的步进电机和伺服电机就成为首选方案。事实证明,用步进电机和伺服电机控制的调速器,确实能适应油质清洁度较差环境,由于可靠性高,使用和维护方便,而且动静态指标都能满足国家调速器技术标准的要求,所以深受广大用户欢迎。

电磁比例阀和伺服比例阀是液压工业中的标准件,生产量大,在工业控制系统中得到广泛应用。用作水轮机调速器电液随动系统的电液转换部件是十分适合的,通常由伺服比例阀和辅助接力器等构成电气液压伺服系统,如图 3 所示。我国有一些单位,采用比例阀时,遵守了比例阀应用条件,保证油液中杂质 $< 20 \mu$, 都取得了满意的效果。将比例阀和液压逻辑控制元件集成于功能模块上,调速器的结构十分紧凑。由于在采用比例阀控制的调速器中控制信息的传递和变换都是流量,可以实现无间隙的传递,极大地降低了死区并提高了反应的灵敏度,使调速器整机静动特性优越,这类调速器也受到用户的欢迎。据不完全统计,近年来,这类调速器的生产量也在逐年增加。

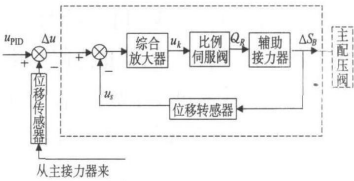


图 3 电气液压伺服系统

Fig. 3 Electrohydraulic servosystem

应该指出的是,有人认为比例阀的通频带大于 10 Hz,而实验测出用伺服电机的电/机转换部件的频带宽度仅为 3 Hz。据此说明比例阀速动性高于采用伺服电机的电/机转换部件,这是不对的。比例阀的输出是流量,其通频带宽度是反应比例阀的输出流量对输入控制信号的响应速度,还不能反应辅助接力器对输入信号的响应速度,可以预计,由放大器、比例阀、辅助接力器和位移传感器构成的电气液压位置伺服系统的频率响应带宽较比例阀本身的带宽要小得多。但是,大量的已投入运行调速器证明,频带宽为 3 Hz 的电/机转换器和频带宽为 10Hz 的比例阀都能满足调速器动态和静态特性的要求。

2.3 接力器位置机械反馈和机械开度限制机构

目前国内生产的电机(步进、伺服)控制的调速

器, 由于电/机转换部件可靠性高, 调速器的故障降低, 逐渐取消了机械开度限制机构和接力器位置的机械反馈, 使调速器的机械部分结构简单, 调速器安装调整和维护方便, 深受用户欢迎。目前国内几家专业生产厂在有了能自动复中的电/机转换部件以后, 都推出了取消机械反馈和机械开度限制的微机调速器新产品, 这是当今微机调速器发展的必然趋势。20 世纪末, 国外一些知名的调速器制造商, 在采用电伺服比例阀和液压集成块结构的同时, 也取消了机械反馈和机构开度限制。但是国内一些大型水电站和一些在电网中重要的电站, 投标时十分强调要在微机调速器中保留机械开度限制机构和接力器位移的机械反馈, 这些要求是十分正常和可以理解的。尤其是采用伺服比例阀的调速器, 这类调速器信号的传递都是在液压集成块内的流量, 而没有显现在外的机械位移, 在电源消失时或电气故障时主配压阀的机械位置、接力器位置都没有指示, 也没有任何可以人工控制和操作的机构, 给事故处理、事故分析造成困难。因此, 在给大型水力发电机组配套调速器时保留机械开度限制、接力器的位置机械反馈和系统机械手动操作机构十分必要。

2.4 关于双机冗余问题

为了提高微机调速器的可靠性, 20 世纪 80 年代我国设计的微机调速器大多数采用了双机冗余结构, 一台微机工作, 另一台热备用。每台机对自己的模块和分管的部件进行自检, 两机之间互相通讯和监视。当工作机被诊断出发生故障时, 则自动切换到备用机, 确保调速器在部分故障时能继续运行, 达到提高可靠性的目的。然而在 20 世纪末, 当可编程控制器广泛用作微机调速器的硬件核心以后, 我国大部分专业生产厂不再生产双机冗余的微机调速器。究其原因有如下几条: ①国际知名商家生产的可编程控制器的可靠性很高, 没有必要再用双机冗余系统。②原来的双机冗余系统中自制的切换部分故障率较高, 成了调速器的薄弱环节。这部分的故障率往往高于微机本身, 以致使个别双机冗余的调速器故障率高于单机的可编程调速器。③由于微机本身故障率很低, 即使采用了双机冗余结构, 在实际运行中难以查觉进一步降低故障率的效果。

3 展望

近十多年来, 通过广大工程技术人员努力, 我国水轮机调节技术取得了显著的进步, 获得一批具有国际先进水平的科研成果, 创造了具有我国自主知识

产权的微机调速器新产品, 为水电建设提供品种丰富、品质优良的水轮机控制设备, 较好地满足了迅速发展的水电建设事业的需求, 有力地支持了电力工业生产。但是, 近年来由于各生产厂生产任务重, 对目前一些经济效益尚不显著的科研项目和产品投入不足, 因此, 建议今后共同努力做好如下几件事。

3.1 努力贯彻有关水轮机调速器的各类标准

我国已有十余种水轮机调速器国家标准和行业标准, 这是一项了不起的成绩, 随着时间的推移要进行必要的修订或按实际要求制定新的标准, 各产品研发部门也要提出完整的企业标准, 任务还相当繁重, 应引进重视。

为贯彻相应标准, 相当多的产品制造部门尚没有开展电磁兼容试验, 也不具备相应的试验设备, 再如, 国家标准及行业标准中要求: “测定转速死区所用信号发生器输出信号的误差及相应仪表测量误差的换算值应小于转速死区规定值的 $1/10$ ”。如果大型电液调速器规定值为 0.04% , 则仪表测量误差值及频率信号发生器的误差应小于 $0.004\% \times 50 \text{ Hz} = 0.002 \text{ Hz}$; 现在水轮机调速器产品定货时要求过高, 有的提出 $i_x \leq 0.01\%$, 则要求相应误差应为 0.0005 Hz , 到目前为止这样精度的信号源及仪表尚难找寻。

这里仅用例子说明水轮机调速器供需双方对调速器的死区不应有刻意的追求。同时在测试技术及相关仪器设备上应积极开展研制工作, 否则会带来一系列商务上的麻烦。上述研制工作花费巨大, 政府主管部门应给予重视和支持。

3.2 重视油压装置的优化设计和制造

我国油压装置几十年都是一个面貌, 这种局面并没有引起人们的关注, 20 世纪 60 年代所用的电液转换器的抗油污能差, 调速器故障率比较高。当时只注意研究抗油污能力强的电液转换器, 而没有去研究对油清洁度的控制, 提高油液的清洁度。20 世纪 80 年代引进国外先进的电液伺服阀, 由于油质清洁度不能保证而以失败告终。应该指出, 如果我们还不优化油压装置设计, 加强油压装置的滤油手段和技术措施, 目前正在微机调速器中推广使用的伺服比例阀和标准液压件, 将难长期正常运行, 也难以发挥其优越性。建议将来在招标文件中应明确要求油压装置供油的清洁度和滤油技术措施。生产油压装置的专业厂应开发能保证油液清洁度的油压装置。

3.3 注重液压技术新成果的应用

继续吸纳液压技术新成果, 扩大采用标准液压件的范围, 用液压技术提升水轮机调速器技术水平

和质量。开发采用标准液压件中小型调速器和调速系统相关的控制设备,并标准化、系列化。

3.4 与主机厂联合设计调速器新品种

目前调速器专业公司开发的高油压调速器,将接力器外置,可以降低调速器和主机造价,提高调速系统品质。建议组织主机厂与调速器专业厂联合设计,并制定相互连接的标准。冲击水轮机调速器与主机联系也比较多,利用目前水轮机调节专业已取得的成果,与主机厂联合可以设计出更新更好的冲击式水轮机调速器。

3.5 适合农村小水电站综合控制设备的研究

目前我国小型水电厂自动化水平仍然处于比较落后的状态,国家从 2002 年开始,对单机容量大于 1 000 kW 的小型水电站要求采用计算机控制,对 20 世纪 90 年代以前建设的小电厂,按总体目标要求做出更新改造规划。我国小型水电厂自动化发展的总体目标是:在 2010 年 50% 农村小型水电厂及配套电网达到现代化水平;2015 年农村水电行业全面实现现代化,其中总装机 5 MW 及以上的水电站调速器,励磁和厂内油、水、气、闸门等设备应采用微机控制。可见摆在我们面前的任务很多很重,希望有志于农村

水电自动化的专业厂商制定切实可行的研科设计和实施方案,为我国农村小水电自动化作出贡献。

参考文献:

[1] 吴应文. 三峡电站水轮机调速器的关键技术及国产化问题初探[J]. 长江科学院院报, 2003, (3): 53- 56.
[2] 郭建业. 关于高油压调速器技术的应用[J]. 水力发电, 2003, (9): 43- 46.
[3] 吴应文. 水轮机调速器发展及技术改造若干问题的探讨[J]. 浙江电力, 1994, (11): 34- 36.
[4] 魏守平. 水轮机控制工程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
[5] 潘熙和, 周国斌. 水轮机可编程调速器若干问题研究[J]. 长江科学院院报, 2001, 55- 57.
[6] 潘熙和, 严国强. PCC 水轮机调速器与 PCC 励磁研究与应用[J]. 人民长江, 2005, (12): 33- 35.
[7] 黄业华, 蔡维由, 潘熙和. 用 PPC 机作为人机界面的水轮机微机调速器[J]. 华东电力, 2003, (8): 75- 77.
[8] 潘熙和, 王丽娟, 雷玉波, 等. 多喷嘴冲击式水轮机调速器在阿鹇田水电站的应用[J]. 水力发电, 2006, (2): 45- 47.

(编辑: 陈绍选)

Progress and Prospect of Domestic Turbine Control Technology

PAN Xi-he, JIA Bao-liang, WU Ying-wen

(Wuhan Changjiang Control Equipment Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: By means of analyzing the recent technical level of domestic turbine governor researching manufacturers, this paper summarizes from following aspects: the governor's system structure modes, the microcomputer adjustors composed of industry control computers, dual-redundant computer issue, friendly man-machine interfaces with plenty contents, the governor's computer analog test functions, hydraulic components adopted the industry standard such as a proportional servo valve or an electrohydraulic converter composed of a servo motor, the setup of mechanical feedback and mechanical opening limited mechanism, the governor's generally raised oil pressure grade. The result indicates that the main technical indexes of domestic turbine microcomputer governor generally can meet the requirements of the national technical standard, and some manufacturers' product technical indexes have reached the international advanced grade. Meanwhile, the struggling object of domestic turbine control technology from "carrying out relevant standards concerning about turbine governor" and other four aspects are posed.

Key words: turbine governor; system structure; industry control computer; industry standard hydraulic component; following system