

技 术 丛 书

中小型水轮机

调速器的原理调试与故障分析处理

蔡维由 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

中小型水电站运行与管理技术丛书



中小型水轮机调速器原理调试与故障分析处理

中小型水轮发电机组运行与检修

中小型水电站计算机监测与控制

中小型水电站辅助设备及自动化

中小型水电站电气设备

中小型水轮发电机励磁装置

中小型水电站运行维护与管理

ISBN 7-5083-4206-2



9 787508 342061 >

定价: 20.00 元

销售分类建议: 电力工程

中 小 型 水 电 站 运 行 与 管 理 技 术 从 书

中小型水轮机 调速器的原理调试与故障分析处理

蔡维由 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《中小型水电站运行与管理技术丛书》之一,共分为九章。第一章水轮机调节系统的基本概念及工作原理;第二章机械液压型调速器;第三章机械液压型调速器的调试与故障分析;第四章电气液压型调速器;第五章电气液压型调速器的调试与故障分析;第六章微机调速器;第七章微机调速器现场调试与故障分析;第八章水轮机调速器的运行与维护;第九章几种可编程微机调速器简介。每章附有相关复习思考题,便于自学。

本书可作为中小型水电站水轮机调速器的培训教材,也可供其他水电站及相关单位的有关技术人员、大学、高职高专、中等技术学校等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中小型水轮机调速器的原理调试与故障分析处理/
蔡维由主编. —北京:中国电力出版社, 2006
(中小型水电站运行与管理技术丛书)
ISBN 7-5083-4206-2

I. 中… II. 蔡… III. ①水轮机-调速器-调试
②水轮机-调速器-故障诊断 IV. TK730.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 027415 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)
北京同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 298 千字
印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

中小型水电站运行与管理技术丛书

编 委 会

主 任：余卫国

副主任：谭少华 蔡维由 王贞伟 刘克兴

委 员：（以姓氏笔划为序）

王贞伟	毛慧和	付国锋	江小兵	刘克兴
刘金生	刘国刚	刘柄文	陈启卷	陈 涛
李学超	肖志怀	肖惠民	余卫国	张天明
张成平	罗仁彩	姬巧玲	职小前	程远楚
谭少华	蔡天富	蔡维由		

目前,我国大型水电厂普遍采用计算机监控,并逐步实现了“无人值班”(少人值守),自动化水平较高。而中小型水电站,特别是小型水电站,其自动化水平仍处于比较落后的状态。为加快农村现代化建设,繁荣农村经济,水利部于2003年4月28日印发了水电[2003]170号文件——《农村水电技术现代化指导意见》。“意见”提出了农村水电技术现代化的总体目标是:“2010年前,50%的农村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。通过科技创新和管理创新使农村水电市场竞争力明显提高”。同时在任务和要求中还提出:新建水电厂都要按“无人值班”(少人值守)进行设计和建设;要推广使用新型高效水轮发电机组;总装机在5MW及以上的水电厂,应采用全开放、分层分布式计算机监控系统;调速器、励磁装置和厂内油、气、水、直流系统、闸门等设备的监测控制应采用微机控制系统,计算机监控系统与设备控制单元之间的数据通讯可通过现场总线、串行通信或I/O等方式进行;信息管理系统(MIS系统,包括生产管理、财务管理、人力资源管理、电力营销管理、办公自动化等)开发应注意实用性和适应性,推广企业资源规划(ERP),充分利用企业MIS、SCADA等系统信息,建造企业的ERP平台,可试点使用电力市场技术支持系统,以满足“竞价上网”的要求,降低企业运营成本,提高经济效益。为了实现“意见”中提出的目标和任务,水利部和各省、区水利厅都在进一步制定规划和实施方案。同时,积极开展科技人员继续教育和职工技术培训,逐步完善专业培训和考核制度,提高农村水电职工的业务素质。《中小型水电站技术与管理》丛书正是为了满足这一要求而编写出版的。

中小型水电站一般地处农村山区,大部分连接于地区电网,以满足地区负荷所需。单机容量普遍较小,机组事故停机对系统影响也较小,对自动化设备的技术要求不必按大型水电厂要求那么严格,功能也不必求全,主要应以安全可靠,经济实用、结构简单、功能满足要求为度。因此,本丛书各分册在取材和叙述风格上尽量简明扼要、通俗易懂,不罗列繁琐的公式推导。

《中小型水轮机调速器的原理调试与故障分析》是本套丛书之一,根据目前中小型水电站的水轮机调速器已大部分采用微机调速器,故全书加强了微机调速器的原理、结构及各种伺服系统的介绍,同时,考虑到在小型水电站中仍有一定数量的YT型机械液压型调速器在运行,因此对YT型机调的原理、调试及故障分析也作了较为详细的介绍。而模拟电液调速器目前在中小型水电站已经很少,因此,仅以YDT-1800A电调作为实例进行介绍。全书共分为九章,第一章介绍水轮机调节系统的基本概念及工作原理;第二章以YT型机调为例,

介绍了 YT 型机调的主要部件及工作原理、YT 型调速器的工作原理和油压装置；第三章以 YT 型机调为例，介绍了机械液压型调速器的调试与故障分析；第四章以 YDT—1800A 电调为例，介绍了电气液压型调速器各回路及工作原理，以及其机械液压系统中的特殊部件；第五章中介绍了电气液压型调速器的调试和故障分析，以及电液调速器的运行操作；第六章对微机调速器的原理、可编程微机调节器系统组成、微机调速器的控制软件、微机调速器的各种伺服系统进行了较为详细的介绍；第七章介绍了微机调速器的现场调试与故障分析；第八章对水轮机调速器的日常运行维护和运行中的故障分析处理作了综合介绍；第九章对目前中小型水轮机调速器的典型实例进行介绍。而且，每章后还附有相关复习思考题。

本书可作为中小型水电站水轮机调速器的培训教材，也可供其他水电站及相关单位的有关技术人员、大学、高职高专、中等技术学校等相关专业的师生参考。

全书由蔡维由教授担任主编，具体各章由姬巧玲博士和蔡维由教授共同编写。刘炳文教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见。

本书编写过程中，博士生漆为民，硕士生郑应霞、陈荣洲、刘斌、郑惠娟、叶青等做了许多资料整理、部分文字录入等工作。武汉四创自动控制技术有限责任公司的陈启明部长、武汉汉诺优电控有限责任公司的郭建业董事长和郭恩总经理、长江控制设备研究所销售部季卫部长等提供了许多调速器资料，在此，对这些同志表示衷心的感谢。同时，也对本书引用和参考的有关书籍和文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编者

2006 年 3 月

目 录

前言

第一章 水轮机调节的基本概念及工作原理 1

第一节 水轮机调节的任务和特点	1
第二节 水轮机调速系统的工作原理	3
第三节 水轮机调速器的发展与分类	7
第四节 水轮机调速器的功能和调节系统的静动态特性	11
第五节 水轮机调节系统并列运行中静态分析	14
复习思考题	18

第二章 机械液压型调速器 19

第一节 机械液压型调速器概述	19
第二节 YT型机械液压调速器的主要部件及工作原理	21
第三节 YT型调速器的工作原理	31
第四节 油压装置	36
复习思考题	41

第三章 机械液压型调速器的调试与故障分析处理 42

第一节 YT型调速器主要部件的调试与故障分析处理	42
第二节 YT型调速器整机静态调试与故障分析处理	49
第三节 YT型调速器调节系统动态特性调试	61
复习思考题	70

第四章 电气液压型调速器 71

第一节 测频回路	72
第二节 测频微分回路	76
第三节 软反馈回路	77
第四节 永态转差与功率给定回路	80
第五节 信号综合放大回路	82
第六节 电源、转速测量及无信号保护电路	83
第七节 机械液压系统中的特殊部件	86
第八节 YDT-1800A型电液调速器的机械液压系统	90

复习思考题	93
第五章 电气液压型调速器的调试与故障分析处理	94
第一节 电液调速器主要回路的检查与调整	94
第二节 电液调速器整机静态调试与故障分析处理	95
第三节 电液调速器调节系统动态特性试验	100
第四节 电液调速器的运行操作与维护	103
复习思考题	106
第六章 微机调速器	107
第一节 微机调速器概述	107
第二节 微机调速器的原理框图及控制算法	108
第三节 可编程微机调节器	111
第四节 微机调速器的控制软件	126
第五节 微机调速器的伺服系统	131
复习思考题	137
第七章 微机调速器现场调试与故障分析处理	138
第一节 微机调速器现场调试概述	138
第二节 微机调速器的整机静态调试	139
第三节 微机调速器调节系统动态特性试验	142
第四节 微机调速器调试中的故障分析处理	144
复习思考题	146
第八章 水轮机调速器的运行与维护	147
第一节 水轮机调速器的日常运行维护	147
第二节 调速器运行中的故障分析及处理	151
复习思考题	156
第九章 几种可编程微机调速器简介	157
第一节 BW (S) T—PLC 型无油电转可编程微机调速器	157
第二节 (G) LYWT—PLC 系列全数字可编程微机调速器	162
第三节 BLW (S) T—PLC 系列伺服比例阀式可编程微机调速器	166
第四节 WCF—N/N 系列冲击式可编程微机调速器	170
第五节 中小型比例阀高油压可编程微机调速器	175
第六节 YKT 系列中小型可编程微机调速器	183
参考文献	188

中小型水电站运行与管理技术丛书
中小型水轮机调速器的原理调试与
故障分析处理
第一章

水轮机调节的基本概念及工作原理

第一节 水轮机调节的任务和特点

一、水轮机调节的任务及途径

水轮发电机组把水能转换成电能供用户使用,用户除要求供电安全可靠外,还要求电能的频率及电压保持在额定值附近的某一范围内,若频率偏离额定值过大,就会直接影响用户的产品质量。例如纺织、造纸等机械,当频率波动过大时,将导致异步电动机转速时快时慢,则纺织机织出的布则疏密不一,造纸机生产出的纸张则厚薄不均。如果频率下降过大,不仅使磨煤机之类的机械出力下降,还可能导致汽轮机叶片振动加剧,核电厂反应堆冷却介质泵停泵,致使核反应堆停止运行,也可能使工业和国防部门使用的精密电子设备无法正常工作。因此,对大型电力系统要求频率波动值不超过 $\pm 0.4\%$ ($\pm 0.2\text{Hz}$),对于中小型电网,则要求频率波动值不超过 $\pm 1\%$ ($\pm 0.5\text{Hz}$)。此外,还应保证电钟指示与标准时间的误差在任何时候都不大于30s。

电力系统的负荷总是在不断变化的,有些随机变化的负荷波动的周期为几秒至几十分钟,这种负荷波动的幅值通常可达系统总容量的2%~3%,而且是不可预见的。此外,一天之内系统负荷有上午、晚上两个高峰和中午、深夜两个低谷,这种周期性变化负荷基本上是可预见的。但从低谷过渡到高峰的速度往往较快,如有的电力系统记录到每分钟负荷增加达系统总容量的1%。电力系统负荷变化必然导致系统频率的变化。

因此,必须根据负荷的变化不断地调节水轮发电机组的有功功率输出,以维持机组转速(频率)在规定范围内,这就是水轮机调节的基本任务。

既然电力系统要求水轮发电机组能够对其输出的有功功率进行调节,那么采用什么方法与途径来完成这一调节任务呢?为回答这一问题,我们必须先讨论一下一台机组带负荷时的运行情况。

水轮发电机组的转动部分是一个围绕固定轴线作旋转运动的刚体(如图1-1),它的运动可由式(1-1)来描述

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

式中: J 为机组转动部分惯性力矩, $J = \frac{GD^2}{4g}$; GD^2 为机组飞轮力矩; g 为重力加速度; ω 为角速度, $\omega = \frac{n\pi}{30}$ (n 为机组

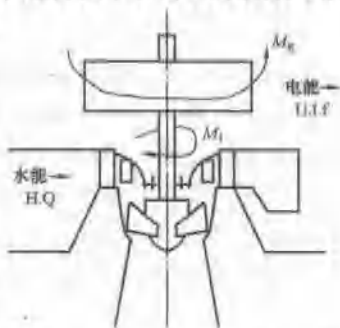


图 1-1 水轮发电机组示意图

转速); M_1 为水轮机主动力矩; M_g 为发电机阻力矩。

从式 (1-1) 可以看出, 要使机组的频率恒定, 就要使机组转速恒定, 也就是要使角速度增量 $d\omega = 0$, 那么就应当使水轮机的主动力矩 M_1 能与发电机的阻力矩 M_g 保持平衡, 即负荷变化时引起阻力矩变化, 则水轮机应能迅速调节本身的输出主动力矩, 以维持频率恒定。

因为水轮机的输出主动力矩为

$$M_1 = P/\omega \quad (1-2)$$

式中: P 为水轮机输出功率, $P = 9.81HQ\eta$; H 为水轮机工作水头; Q 为通过转轮的水流流量; η 为水轮机效率。

显然, 要调节水轮机输出的主动力矩就是要调节水轮机输出功率, 其中最有效的方法和途径是调节水轮机的流量。而流量的调节是通过改变导水机构 (即水轮机的活动导叶) 的开度来实现的。对转桨式、贯流式和冲击式水轮机, 还可以通过协调调节轮叶转角或喷针行程来共同实现对流量的调节, 而实现这种调节的控制装置就是水轮机调速器。

二、水轮机调节的特点

水轮机调节系统是由水轮机调速器和调节对象 (包括引水系统、水轮机、发电机及负载) 共同组成的。

水轮机调节系统与其他原动机调节系统相比有以下特点。

1. 必须具备有足够大的调节功

水轮发电机组是把水能转换成电能的机械, 而水能因受自然条件的限制, 通常水电站水头在几米至几百米的范围内, 水轮机上的压力只有零点几 MPa 至几 MPa。因此, 发出较多的电功率, 常需相当大的流量, 水轮机及其导水机构尺寸也需要相应加大。为推动笨重的导水机构需要有足够大的调节功, 调速器需要设置多级液压放大 (通常为两级) 和外加能源 (油压装置), 并采用较大的液压接力器作为执行元件。

2. 调节滞后易产生过调节

水轮机调节装置 (即调速器) 的执行机构——液压接力器具有较大的时间常数 (一般达零点几秒到几秒), 调节对象也有较大的惯性时间。因此, 当负荷变化时, 导水机构不可能突然动作, 以使水轮机的主动力矩适应外界负荷的变化, 而是有一定的延迟时间, 在这时间内机组转速不断升高或降低。当导水机构变化到动力矩与阻力矩相适应时, 这时转速偏离额定值已有一定的数量, 要使转速恢复到额定值也要有一定的时间, 此时导水机构变化的数值又已超过需要调节的数值了, 这就是所谓的过调节现象。这种过调节现象使水轮机调节系统变得不容易稳定。

3. 水击的反调效应

水电站因受自然条件的限制, 常有较长的压力过水管道, 管道长, 水流惯性大, 导水机构开关时会在压力过水管道内引起水击 (即水轮机工作水头变化) 作用。而水击作用通常是与导水机构瞬间的调节作用相反, 即导水机构关闭使机组输入能量与输出功率减少。但此时产生的水击会使机组功率增加并部分抵消调节作用, 使调节作用产生滞后, 从而恶化了调节系统的动态品质, 而且不利于水轮机调节系统的稳定。这种水击反调效应的大小, 通常用压力引水管道的水流惯性时间常数 T_w 来表示, 即

$$T_w = \frac{\sum L_i V_{0i}}{gH_0} \quad (1-3)$$

式中: $\sum L_i V_{0i}$ 为压力管道长度 L_i 与对应管段初始流速 V_{0i} 乘积之和; H_0 为电站静水头。

对于长引水管电站或低水头电站, T_w 一般较大, 故水击的反调效应造成的调节滞后作用就更加显著, 因而这类电站的水轮机调节系统的稳定性就更差, 同时也恶化了调节系统的动态品质。为了提高稳定性和改善调节系统的性能, 通常在水轮机调速器中引进不同的校正环节, 形成了不同调节规律的调速器。一般 PI 调速器适用于 T_w 不大于 2.5s 的情况; PID 调速器可适用于 T_w 不大于 4s 的情况。当 T_w 过大时, 调节系统就很难稳定了, 而调节品质也将变差。为此, 必须在压力引水系统设计时采用必要措施, 以保证 T_w 不致过大。另外, 为了限制压力引水管道中水压最大变化值, 必须限制导水机构的运动速度, 这对调节系统动态特性也有不利的影响。

4. 结构较复杂

对于低水头的转桨式水轮机和贯流式水轮机, 为了提高水轮机的效率, 以确保在不同水头下均能获得较高的运行效率, 其不仅要调节导水机构, 还要调节桨叶开度; 而对高水头的冲击式水轮机, 则要调节喷嘴和折向器。另外, 有的混流式水轮机装有控制水击作用的调压阀。于是, 对于这样的一些水轮机, 其调速器中需增加一套调节执行机构 (通常是随动系统), 从而增加了调速器结构的复杂性。此外, 水轮机调速器还有控制机构 (如机械开限和紧急停机装置等), 有的还有分段关闭装置。

总之, 水轮机调节系统相对来说, 是不易稳定的, 所以水轮机调速器的结构相对于其他原动机的控制装置要复杂些, 放大元件的级数也多一些, 功能也更强一些。

第二节 水轮机调速系统的工作原理

水轮发电机组的运行调节、工况转换和操作, 都是在具有相应功能的水轮机调速器控制下实现的。如当用户负荷变化时, 水轮机调速器则按一定的调节规律控制导水机构改变进入水轮机转轮的流量, 以恢复机组的力矩平衡和转速稳定, 形成无差或有差调节特性等等, 这些都是水轮机自动调速器完成的。为了说明调速系统的工作原理, 现以直观易懂的机械液压型调速器为例, 经简化后绘制成如图 1-2 所示型式。

一、自动调速器的组成

图 1-2 是单调节机械液压型调速器原理简图, 主要由离心摆 1、引导阀 10、辅助接力器 35、主配压阀 37、主接力器 39、缓冲器 18、调差机构 25、手动控制手轮 21 及杠杆系统等组成。它们之间相互关系如本章第三节中的机械液压型调速器方块图 1-3 所示。

离心摆用于测量机组转速, 并把转速信号变为引导阀的位移信号, 由于离心摆的负载能力很小, 要推动笨重的导水机构, 必须添加放大装置。为此, 引导阀和辅助接力器构成第一级液压放大装置, 主配压阀和主接力器构成第二级液压放大装置。从辅助接力器输出引一信号送回引导阀的输入端, 作为第一级液压放大装置的内部反馈, 从主接力器输出引一信号经缓冲器和调差机构到引导阀输入端, 作为主反馈信号。

二、自动调速器的工作原理

1. 离心摆的动作原理

如图 1-2 所示, 离心摆由钢带 2、重块 4、下支持块 7、限位架 3、调节螺母 5、压缩弹簧 6 和离心摆转轴及上支持块等组成。

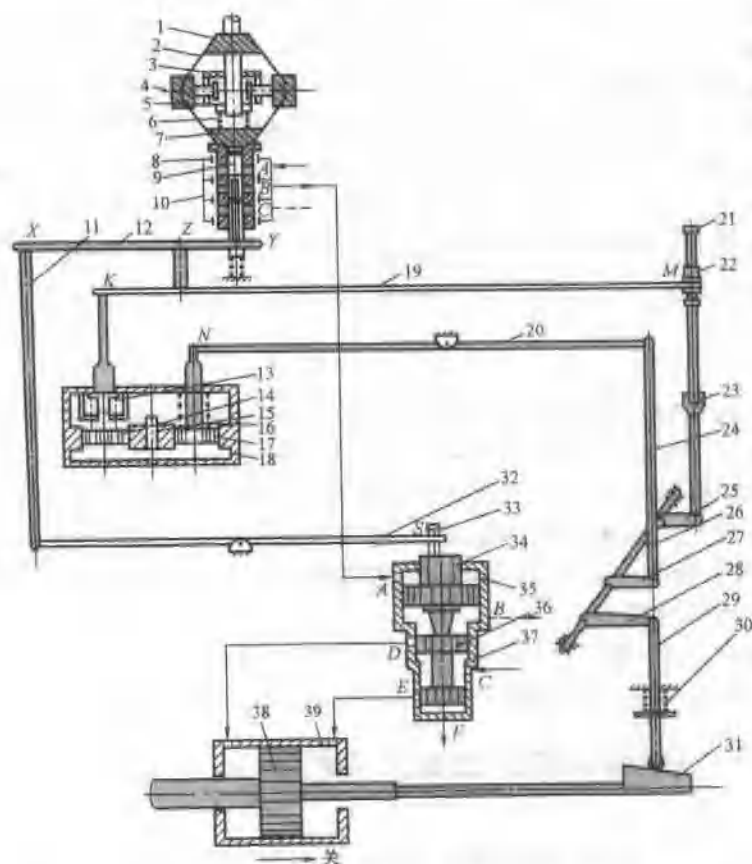


图 1-2 单调节机械液压型调速器原理简图

1—离心摆；2—钢带；3—限位架；4—重块；5—调节螺母；6、13、16—压缩弹簧；7—下支持块；8—引导阀转动套；9—引导阀针阀；10—引导阀阀壳；11、24、29—拉杆；12、19、20、32—杠杆；14—缓冲器从动活塞；15—节流阀；17—缓冲器主动活塞；18—缓冲器；21—手轮；22—螺母；23—丝杆；25、27、28—拐臂；26—回复臂；30—弹簧；31—斜块；33—调节螺钉；34—辅助接力器活塞；35—辅助接力器；36—主配压阀阀体；37—主配压阀壳体；38—主接力器活塞；39—主接力器

钢带包在下支持块的外圆上，并固定在一起，两个重块挂在钢带的两侧，上支持块与转轴通过固定销连接，钢带上部通过螺钉固定在上支持块上，压缩弹簧位于调节螺母和下支持块之间，改变调节螺母位置相当于改变给定转速。装在离心摆上面的电动机通过转轴拖动离心摆转动，转动时重块 4 产生的离心力使钢带向外扩张，并带动下支持块 7 上移压缩弹簧 6。当离心摆处于某一位置时，作用在离心摆上的各种力正好平衡，使离心摆处于某一平衡状态运行。若此时转速升高，重块的离心力亦增加，于是克服弹簧阻力带动下支持块上移；若转速降低，则离心力减小，弹簧力使下支持块下移。下支持块的位移即为离心摆的输出信号，在忽略惯性力和液压摩阻力时，离心摆的输出量与输入量成正比关系，故离心摆是一个比例环节。

带动离心摆转动的交流感应电动机的电源有两种：①来自与主机同轴的永磁发电机；②来自发电机机端电压互感器。电动机频率反映了机组的转速，所以离心摆的转速变化亦反映了机组的转速变化。以往在大中型水轮发电机组上，一般都采用永磁发电机作为离心摆的电源，这是因为在主机励磁切除的情况下，永磁发电机仍可保证离心摆及调速器正常工作，从而可提高离心摆电源的可靠性，减少外部干扰。但采用永磁发电机会增加主机结构的投资。故在小型机组上一般只采用机端电压互感器供电的方式。

2. 液压放大装置的工作原理

第一级液压放大装置由引导阀和辅助接力器构成，但引导阀与离心摆组成一体，而辅助接力器与主配压阀联成一体，二者之间通过油流来传递调节信号，并通过杠杆传递反馈信号。

如图 1-2 所示, 引导阀由引导阀阀壳 10、引导阀转动套 8 和引导阀针阀 9 等组成。在机械液压型调速器中, 转动套是与离心摆的下支持块连在一起并随离心摆一起旋转的, 故它的位置高低能反映机组转速的高低。在转动套上开有三排油孔, 上排油孔与压力油相通, 下排油孔与排油接通, 中间油孔通过油管与辅助接力活塞工作腔 (即图中辅接活塞的上腔) 相连。针阀有上、下两个阀盘, 当处于平衡状态时正好盖住转动套上、下两排油孔, 此时, 中间 B 腔中的油液将具有某一油压, 该油压亦传至辅助接力器工作腔。当转动套随离心摆转速上升而上移时, 其上排油孔封闭, 下排油孔打开, 中间 B 腔与排油接通, 则辅助接力器工作腔通排油, 油压降低。反之, 当转动套随离心摆转速下降而下移时, 则其下排油孔封闭, 上排油孔打开, 使中间 B 腔与上排油孔压力油相通, 则辅助接力器工作腔通压力油, 压力上升。故引导阀的作用是把转动套的位移 (即离心摆下支持块的位移) 转化为油压的变化传递给辅助接力器去控制其活塞的运动。

辅助接力器活塞 34 是差动的, 活塞的下腔接通排油, 压力为零, 而活塞上腔 (即工作腔) 的环形面积上作用着从引导阀中腔引来的某一油压 P_i 。因此, 有一个向下的力, 其值为

$$P_A = P_i F_A$$

式中: P_i 为从引导阀中腔输出出来的油压; F_A 为辅助接力器活塞 34 上表面的环形面积; P_A 为作用在辅助接力器活塞 34 上的油压力。

第二级液压放大装置由主配压阀和主接力器组成, 由于主配压阀阀体与辅助接力器活塞联成整体, 辅助接力器活塞的运动带动主配压阀阀体动作。主配压阀阀体 36 上下两只阀盘直径不相等, 上大下小。两阀盘之间通有压力油 (因主配压阀壳体上也开有三排油孔, 中孔 C 与压力油相通, 上孔口通过油管与接力器活塞左腔连通, 下孔 E 与接力器活塞右腔连通)。故压力油产生的推力同时作用于上阀盘的下表面与下阀盘的上表面。但因上阀盘受油面积大, 所以综合起来是一个向上的作用力, 该力为

$$P_M = P(F_1 - F_2)$$

式中: P_M 为压力油作用在主配压阀阀盘上向上的合力; P 为压力油的压强; F_1 、 F_2 分别为上、下阀盘受油的面积。

辅助接力器和主配压阀的状态取决于 P_M 与 P_A 两力的对比 (不计活塞和阀体重量)。当 $P_M = P_A$ 时, 辅助接力器活塞与主配压阀阀体不动 (即处于平衡状态); 当 $P_M > P_A$ 时, 辅接活塞和主配阀体向上移动; 当 $P_M < P_A$ 时, 辅接活塞和主配阀体向下移动。

辅接活塞的运动又通过调节螺钉 33、杠杆 32、拉杆 11、杠杆 12、传递到引导阀的针阀上, 构成了第一级液压放大装置的内部反馈校正。因为它用杠杆系统来传递信号, 故是一个比例环节。

设转速升高至某一数值, 引导阀转动套亦上移至某一位置, 转动套下孔开启, 辅接活塞上腔油液经转动套下孔与排油接通, 辅接活塞和主配阀体上移, 经过杠杆系统使针阀也上移。当针阀上移到与转动套恢复相对中间位置时, 转动套下孔重新被针阀下阀盘封闭, 引导阀输出的油压也恢复到原来的数值, 于是辅接活塞上的作用力与主配阀体上的作用力恢复平衡, 活塞停止移动。活塞位移 m_A 与引导阀转动套 (或针阀) 位移量 S 是成比例的, 两者位

移的方向相同,其比例系数也就是杠杆系统的传动比 K ,则有

$$m_A = KS$$

此 K 值大约可在 $2 \sim 10$ 之间调整,这样就把离心摆下支持块的位移放大了。同时,由于辅接活塞面积大,可克服几十牛顿至几百牛顿的干摩擦力而不至造成过大的不灵敏度。

但第一级液压放大的力还是不足以推动笨重的导水机构,因此,需要使用第二级液压放大装置。由于第二级液压放大装置的主配压阀阀体是和第一级液压放大装置的输出元件辅助接力器活塞联成整体的,所以主配压阀随着辅接活塞移动。主配压阀控制主接力器,主配衬套的中间油孔 C 与压力油相通,衬套的顶端及底端与排油相通。衬套的上、下油孔与主接力器活塞两侧的油缸相通。当主配阀体在中间位置时,上、下两阀盘正好遮住 D 、 E 两孔,此时,主接力器活塞两侧油压基本相等,活塞不动。若主配阀体上移,则 D 孔与压力油接通, E 孔与排油相通,主接力器在油压作用下向右移动,关闭导水机构。若主配阀体下移则正好相反, D 孔与排油相通, E 孔与压力油接通,接力器活塞在油压作用下向左移动,开启导水机构。

3. 缓冲器工作原理

缓冲器是反馈校正装置,它的性能直接影响水轮机调节系统的稳定。如图 1-2 所示,缓冲器的壳体好像一只连通器,里面充满油。主动活塞 17 通过杠杆 20、拉杆 24、拐臂 27、回复轴 26、拐臂 28、拉杆 29、斜块 31 与接力器活塞相联。从动活塞 14 则通过杠杆 19、12 与引导阀针阀 9 相连。从动活塞由弹簧 13 及其支架定位,正常时处于中间位置。当主动活塞由于接力器活塞右移而被迫下移时,由于油是不可压缩的,而且活塞下部的油瞬间又来不及从节流阀流到上部去,故活塞下部油压升高。此油压力作用在从动活塞下表面上,推动从动活塞上移,从而把信号传送到引导阀上去,从动活塞上移使弹簧压缩。随后,活塞下部的油慢慢地通过节流阀流到活塞的上部,当主动活塞停止下移时,在弹簧反力的作用下,从动活塞也就慢慢地向下回到中间位置。而当主动活塞上移时,活塞下部产生负压,在大气压力的作用下,从动活塞下移,从而把信号传到引导阀上。此时,也压缩从动活塞上的弹簧。随后,由于活塞上部的油慢慢地通过节流阀流到下部,当主动活塞停止上移时,在弹簧反力的作用下,从动活塞又慢慢地向上回复到中间位置。

缓冲器工作特性可由节流阀针塞 15 来调节。如把节流针塞全部打开,此时活塞上、下两腔接通,油可以迅速流动,无论主动活塞如何上、下移动,从动活塞则一直处于中间位置,即信号输出为零,这相当于切除缓冲器。若此时机组处于空载或单机带负荷运行,则水轮机调节系统就会不稳定。这是因为水轮机调节系统含有压力引水系统,在调节过程中,由于水流的惯性产生水击,并引起反调节功率(即反调节效应),致使调节系统产生过调节。如果没有像缓冲器这样的校正装置,调节系统就不会稳定,这一点已在生产实践中得到了证实。当机组单独运行时(如机组在与系统并列之前),如果切除缓冲器,即可观察到调节系统的振荡。所以,机组在单独运行时,是不允许切除缓冲器的。但是,若把节流阀针塞全部关闭,使上、下腔完全隔绝,那么从动活塞在随着主动活塞偏离中间位置后,就不会自动回复到中间位置,而是保持输出信号不变。也就是说,缓冲器产生的反馈信号不仅在调节过程中存在,而且在调节过程结束后依然存在。此时缓冲器成为比例反馈,即硬反馈。在一般情况下,为使机组与系统解列时能稳定运行,缓冲器必须要有 $20\% \sim 60\%$ 的反馈量。当缓冲器变为硬反馈时,也就是说,调节后会有 $20\% \sim 60\%$ 的静态误差,这显然是太大了。所以

在工程实践中,要求缓冲器的反馈信号只在调节过程中存在,而在调节过程结束后必须为零,也就是缓冲器要起软反馈的作用。为此,当把节流阀针塞放在中间某一位置时,缓冲器才会如上面所述的过程工作,即缓冲器主动活塞移动后,从动活塞先跟着偏离中间位置,从而输出一个反馈信号,然后又缓缓地回复到中间位置,输出信号又变为零。

4. 调速系统动作原理

仍以图 1-2 来叙述整个调速系统的动作原理。设机组单独带负荷运行,若负荷突然减少,此时水轮机动力矩大于负荷的阻力矩,机组开始增速,由永磁发电机(或由机组电压互感器)驱动的离心摆电动机转速也随着升高,离心摆下支持块上移,引导阀转动套也跟着上移,引导阀转动套上排油孔封闭,下排油孔打开,使其中间油孔与下排孔排油接通,辅助接力器活塞 34 上腔油压降低。在主配压阀向上作用的油压的驱动下,使辅助接力器活塞 34 与主配压阀阀体 36 一起上移,并通过第一级内部反馈杠杆即杠杆 32、连杆 11 和杠杆 12,使引导阀针阀 9 上移,恢复与转动套的相对位置,于是辅助接力器输出油压恢复原来的数值,辅接活塞与主配压阀阀体停止继续上移。而主配压阀阀体 36 的上移,使其上排油口 D 与压力油接通,而下排油口 E 与排油接通,接力器活塞 38 的左腔进入压力油,右腔连通排油,于是接力器活塞向右移动,关闭导水机构。水轮机的过流量减少,动力矩减少,逐步使机组停止加速,并继而使机组减速,使转速恢复到额定值。另外,在接力器活塞向右移动的过程中,使斜块 31 也向右移,通过拉杆 29、拐臂 28 使回复轴 26 逆时针转动,带动拐臂 27、拉杆 24、杠杆 20,使缓冲器主动活塞 17 下移。活塞下部油压升高,迫使缓冲器从动活塞 14 上移,通过杠杆 19、12,使引导阀针阀又上移,从而使转动套相对针阀占据较低位置,上排油孔打开,下排油孔封闭,使中孔与上孔压力油接通,引导阀输出油压增加,使辅接 34 与主配阀体 36 下移,逐步回复到中间位置,主接力器活塞也停止向右移动,由于导叶关闭,机组转速逐渐下降,转动套下移。同时,缓冲器从动活塞在弹簧反力作用下回到中间位置,并通过杠杆传递,使得引导阀针阀下移恢复与转动套的相对位置,使调速系统进入新的平衡状态。

第三节 水轮机调速器的发展与分类

一、水轮机调速器的发展

人类很早就知道用离心摆作为转速的敏感元件进行测速,但真正用离心摆作为水轮机调速器的测速元件,从而诞生了世界上第一台机械液压型水轮机调速器,还是 19 世纪的末叶。到 20 世纪 30 年代,机械液压型调速器已发展到相当完善的程度。由于机械液压元件工作比较稳定可靠,至今世界上仍有一定数量的机械液压型调速器在水电站运行。但其调节规律基本上是 PI(比例+积分)调节规律。

随着电子工业和科学技术的发展进步,人们意识到用电气回路取代某些机械液压元件将会改善电能控制质量,也会便于实现电站的自动化,但问题却卡在电气—液压转换元件,致使电气液压调速器迟迟没有诞生。

第二次世界大战爆发后,战争促使军事工业获得了迅猛发展。瑞典通用电气公司(ASEA)首先为了军事的需要,发明了一种实用的电气—液压转换元件。很快地,该公司于 1944 年制造出第一台电气液压型调速器,并在瑞典的 Rydboholm 水电站投入运行,宣告了水

轮机调速器进入了第二代电气液压型调速器发展时期。在这一时期中,从电气方面采用的元器件来区分,其发展经历了电子管、晶体管、集成电路三个阶段。但从调节规律来说,不仅有PI(比例+积分)调节规律,而且发展到了PID(比例+积分+微分)调节规律。

到20世纪60年代,国外不少国家生产的电液调速器基本上都具有PID调节规律,如瑞典的ASEA公司生产的FRVV-103型电液调速器。20世纪70年代,国外开始把并联PID调节器用于水轮机调速器中,改善了调节系统的动态品质。

随着计算机技术的发展,特别是微型计算机技术的发展及普及,20世纪70年代加拿大最先成功地研制出世界上第一台数字式调速器,瑞典于1978年研制出适用于卡普兰式机组的数字协联装置。英国格勒斯哥大学和苏格兰水电局于1975年开始合作研究微处理机为基础的自适应式水轮机调速器,并在苏格兰的斯劳伊(SLOY)水电站的32.5MW水轮发电机组上进行了现场试验,获得了较满意的响应特性。当然,该自适应调速器实质上是将机组带不同负荷按大小分成三个区域连同空载工况整定4组运行参数,运行中按不同的工况域切换不同的参数组合。而加拿大G.S.Hope等人研制的数字式自适应调速器则引入了模型参考自适应。日本也是世界上较早研制成功微机调速器的国家之一。20世纪80年代初,日立公司研制的微机调速器就应用于抽水蓄能机组。ABB公司也是研制微机调速器起步较早、发展较快的企业之一,我国福建的沙溪口、贵州的天生桥电站都使用了他们生产的微机调速器。法国的NEYRPIC公司于20世纪80年代初就曾考虑研制微机调速器,但中间停顿了几年,1984年重整旗鼓,并很快推出了以6809CPU为基础的数字调速器DIGPID。我国广州抽水蓄能电站第一期4台300MW的机组就是采用NEYRPIC公司的DIGPID型调速器。德国的西门子(SIEMENS)、奥地利的伏依特(VOITH)等公司的微机调速器相对问世较晚,但目前均有正式产品。我国湖南南津渡水电站引用的贯流式机组的微机调速器就是VOITH公司的产品。美国的伍德华德(WOODWARD)公司一向以其优质的机械液压型调速器在国际上久负盛名,在20世纪50年代至80年代国际上掀起开发模拟式电液调速器的30余年时间里,该公司仍坚持以机械液压型调速器为主,直至20世纪80年代国际上掀起微机调速器浪潮时,才开始关注微机调速器研制,虽然他们的微机调速器问世较晚,但却一举推出了三机容错式微机调速器,并开发出了应用于水轮发电机组、汽轮发电机组、柴油发电机组的系列产品。瑞士的埃舍尔维斯(ESCHER WYSS)和苏尔寿(SULZER)公司,比利时的ACEC公司,挪威的卡瓦挪公司等也均推出了各自的微机调速器,DBS SULZER ESCHER WYSS联合生产的微机调速器用于我国湖北清江隔河岩水电站的300MW机组上,并一次调试投运成功,运行可靠性较高。但国外引进的微机调速器,甚至是著名公司的产品也并非完美无缺,也有存在这样那样一些问题,如有的部分性能指标不满足技术要求,有的初期投运自动不稳定等等。

我国的水轮机调速器制造业是新中国诞生后发展起来的,20世纪50年代和60年代,生产制造了一大批机械液压型调速器。其中有大型机调T型、ST型,中型机调CT型,小型机调YT(XT)型和特小型机调TT型。1958年天津电气传动研究所研制了我国第一台晶体管电液调速器(BDT-100型),哈尔滨大电机研究所于1960年研制了我国第一台电子管电液调速器(DT-100型)。20世纪70年代,长江水利委员会和武汉热工仪表厂合作开发了我国第一台大型集成电路电液调速器(即JST-100),金城江水工机械厂研制生产了中小型YDT-1000A,1800A,3000A型。20世纪70年代和80年代,集成电路电液调速器在我国得到了广泛应用。