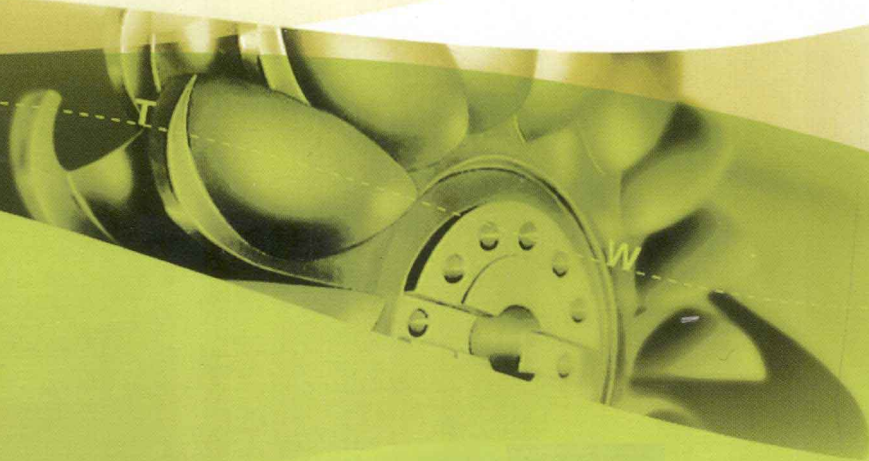


四川省电力公司资助项目

现代水轮机调速器 及其调整与试验

● 蔡燕生 王剑锋 孟宪影 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

四川省电力公司资助项目

现代水轮机调速器 及其调整与试验

蔡燕生 王剑锋 孟宪影 编著
蔡维由 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TK730.4/1

内 容 提 要

本书是关于水轮机调速器调整和试验的入门书,书中主要内容包括水轮机调节的基本原理,微机调节器的结构及工作原理,电液、电机转换装置,机械液压系统,调节系统特性及调整试验,典型微机调速器简介,调节保证计算等。

本书可供从事水轮机调速器安装、运行、维护和调试工作人员参考,也可供工科院校水电类专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代水轮机调速器及其调整与试验/蔡燕生,王剑锋,孟宪影编著. —北京:中国电力出版社,2012.8

ISBN 978-7-5123-3394-9

I. ①现… II. ①蔡…②王…③孟… III. ①水轮机—调速器 IV. ①TK730.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第188535号

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2012年11月第一版 2012年11月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 368千字
印数 0001—2000册 定价 35.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

本书为四川省电力公司科技项目立项资助项目。

撰写本书的目的是反映现代水轮机调速器技术发展状况,介绍调速器调整试验的方法和步骤,为水电站运行、维护人员提供具有一定参考价值的技术书籍。本书具有以下特点:

第一,先进性。本书较为详细地介绍了以可编程控制器为硬件的微机调节器,以伺服比例阀、步进电机和交流伺服电机为电液—电机转换元件的电液—电机转换装置等,介绍了最新国家标准,展示了现代微机调速器的新技术、新标准、新成果。

第二,实用性。本书注重理论联系实际和生产实际应用,归纳整理了几种典型微机调速器调整试验的内容和方法,介绍了高级工程师王剑锋从事调速器调整试验的生产实践总结。

第三,基础性。本书撰写过程中,考虑到各类人员的阅读需要,介绍了水轮机调节的基本原理和基本概念,文字通俗易懂,便于各类人员的自学。

第四,系统性。为使各类人员对水轮机调节有系统的了解,本书还介绍了调节保证计算等内容。

本书第一章以机械液压型调速器为例,介绍了水轮机调节的基本原理、调速器的典型环节和调节规律;第二章介绍了以 FX_{2N} (整体式)、M340 (模块式) 可编程控制器为硬件的微机调节器的基本组成,电气接线,开关量和模拟量输入/输出回路及其工作原理,测频方式及工作原理,微机调节器控制算法与程序框图,人机界面与电源等;第三章介绍了几种典型电液转换装置和电机转换装置的主要元件、组成、作用及装置工作原理等;第四章介绍了标准液压元件的基本知识、结构及工作原理,几种典型的液压放大机构,开度限制机构,紧急停机装置,分段关闭装置和油压装置等;第五章介绍了调节系统特性和微机调速器调整试验的方法和步骤、最新国家标准 GB/T 9652.1—2007《水轮机控制系统技术条件》和 GB/T 9652.2—2007《水轮机控制系统试验》,同时结合调速器试验,着重介绍了某型仿真测试仪的使用方法;第六章介绍了几种典型的微机调速器的参数、功能、性能指标、技术特点和系统组成及工作原理等;第七章介绍了调节保证计算的一般概念和相关基本知识。

本书第一章,第三章,第四章第三、第五节,第六章第六节,第七章由四川电力职业技术学院蔡燕生撰写;第五章由四川电力试验研究院王剑锋和蔡燕生共同撰写;第二章,第四章第一、第二、第四节,第六章第一~第五节由四川电力职业技术学院孟宪影撰写。全书由蔡燕生统稿,蔡维由主审。

武汉大学水利电力学院博士生导师蔡维由教授对本书进行了认真审阅和仔细校对，提出了许多宝贵意见和建议，在此深表感谢。

本书在撰写过程中，参考了许多书籍和调速器制造厂资料，西华大学和四川电力试验研究院的有关专家提出了宝贵意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。与此同时，对本书引用和参考的其他书籍和资料的作者也表示感谢。

由于编者水平和实践经验所限，本书难免有不妥或错误之处，敬请读者批评指正。

编 者
2012 年 8 月

目 录

前言

第一章 水轮机调节的基本原理	1
第一节 水轮机调节的基本概念	1
第二节 水轮机调速系统基本工作原理	6
第三节 水力机组并列运行的静态分析	19
第四节 调速系统的典型环节与调节规律	27
第五节 微机调速器的基本工作原理	32
第六节 调速器的分类和型号	34
第二章 微机调节器	37
第一节 微机调节器结构原理	37
第二节 微机控制器	41
第三节 开关量输入输出回路	56
第四节 模拟量输入输出回路	63
第五节 微机调节器的频率测量	70
第六节 微机调节器的控制算法及软件	81
第七节 微机调节器的其他部件	89
第三章 电液、电机转换装置	96
第一节 电液转换装置	97
第二节 步进电机及驱动器	100
第三节 交流伺服电机及驱动器	105
第四节 数字阀	111
第四章 机械液压系统	115
第一节 液压阀	115
第二节 液压放大机构	122
第三节 其他液压控制机构	127
第四节 油压装置	129
第五节 几种典型机械液压系统	144

第五章 调节系统特性及调整试验	152
第一节 调节对象特性对调节系统的影响	152
第二节 调节参数对系统稳定性的影响	158
第三节 水轮机调速器试验技术规程简介	162
第四节 微机调速器的调试设备和仪器	165
第五节 微机调速器的常规试验	177
第六节 微机调速器的特殊试验	192
第六章 典型微机调速器简介	198
第一节 高油压比例阀式微机调速器	198
第二节 BW (S) T 型微机调速器	205
第三节 DKT - K 系列电机控制式微机调速器	212
第四节 GLYWT 系列全数字式微机调速器	217
第五节 WCT - PLC - 4/4 系列冲击式水轮机微机调速器	222
第六节 大中型水轮机调速器实例	227
第七章 调节保证计算	240
第一节 调节保证计算的任务与标准	240
第二节 调节保证计算简介	241
第三节 转速上升计算	251
第四节 调节保证计算的电算法概述	253
第五节 改善调节保证参数的措施	256
参考文献	260

第一章

水轮机调节的基本原理

第一节 水轮机调节的基本概念

一、水轮机调节的任务

水力发电的生产过程如图 1-1 所示,其过程是由水轮机将水能转变为机械能,再由发电机将机械能转变为电能,送入电力系统供给用户使用。

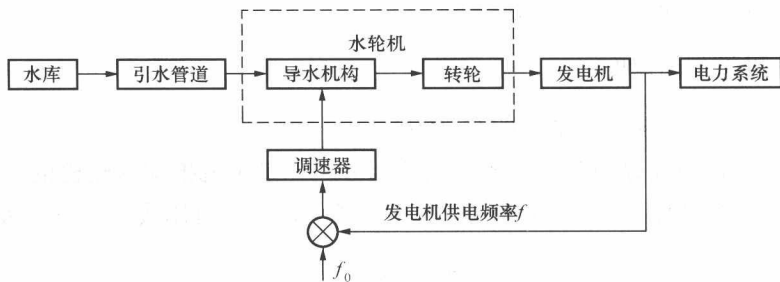


图 1-1 水力发电的生产过程示意图

电能是一种特殊的商品。在电力系统中,发电、供电和用电是同时完成的,而电力系统的负荷是随着时间不断变化的,其负荷变化的周期为几十秒至几十分钟不等,变化幅值可达系统总容量的 2%~3%。例如,一天之内存在上午、晚上两个用电高峰和中午、深夜两个用电低谷等。电力系统负荷的变化必定导致频率的变化。用户除了要求供电安全、可靠和经济外,还要求电能的频率和电压保持在额定值上、下的某一范围内。如果频率和电压的波动值过大,将会造成机械加工工件达不到需要的精度,纺织产品会出现次品和废品,此外,还会影响到水轮发电机组和电力系统自身工作的稳定等。因此,我国电力系统规定:电力系统的频率应保持 50Hz,允许偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。容量小于 3000MW 的地方电网,偏差不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。此外,还应保证电钟指示与标准时间的误差在任何时候均不超过 1min,大容量系统不超过 30s。工业发达国家对频率的偏差范围提出了更高的要求。

在电力系统中,为了使水轮发电机组的供电频率稳定在某一规定的范围内而进行的

调节,称为水轮机调节,或称水轮机控制。

由《电机学》可知:发电机发出的交流电压的频率与发电机组转速之间的关系可用式(1-1)表示,即

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-1)$$

式中 f ——发电机输出交流电压的频率, Hz;

p ——发电机的磁极对数;

n ——发电机的转速, r/min。

发电机的磁极对数取决于发电机的结构。对已制造好的发电机, p 是一个常数, 由式(1-1)可知, 发电机输出的频率与转速成正比。因此, 要保证频率在规定的范围内, 就要根据电力系统负荷的变化, 不断地调节水轮发电机组的有功功率输出, 并维持机组转速在规定的范围内。这就是水轮机调节的基本任务。

二、水轮机调节的途径和方法

如图1-2所示, 水轮机和发电机连成一个整体, 称为水轮发电机组。我们可以把机组转动部分看成一个绕定轴转动的刚体, 根据理论力学可得

$$J \frac{d\omega}{dt} = M \quad (1-2)$$

式中 J ——机组转动部分的转动惯量;

$\frac{d\omega}{dt}$ ——机组角加速度;

M ——作用于机组转动部分的合外力矩。

作用于机组转动部分的合外力矩包括两部分: 一是水流推动水轮机的主动力矩, 用 M_t 表示; 二是发电机阻力矩, 用 M_g 表示, 故式(1-2)可用式(1-3)表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1-3)$$

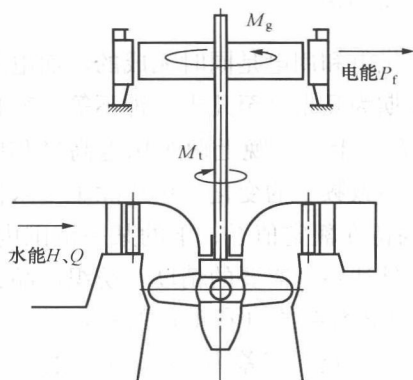


图 1-2 水轮发电机组示意

发电机阻力矩 M_g 随着用电负荷的变化而变化。当动力矩和阻力矩失去平衡时, 机组转速就会随之变化。由式(1-3)可知, 转速的变化有三种情况:

(1) 当 $M_t > M_g$ 时, $\frac{d\omega}{dt} > 0$, 说明电网负荷减少, 机组转速上升, 电网频率升高。这时需要减小水轮机动力矩, 使动力矩与阻力矩相等, 电网的频率恢复到正常范围。

(2) $M_t = M_g$ 时, 机组转速保持不变。

(3) $M_t < M_g$ 时, $\frac{d\omega}{dt} < 0$, 电网负荷增加,

机组转速下降, 电网频率下降。这时需要增大水轮机动力矩, 使电网频率恢复到正常范围。

由上可知,当发电机阻力矩发生变化时,如果不对水轮机动力矩进行调节,就会引起机组转速或电网频率改变。下面分析怎样对水轮机动力矩进行调节。

水轮机动力矩与水轮机工作水头、水轮机导叶开度或者说流量和角速度等有关,根据水轮机出力公式 $P = 9.81HQ\eta$ 和 $P = M_t\omega$ 可得

$$M_t = \frac{9.81HQ\eta}{\omega} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,从理论上讲,通过改变水轮机流量 Q 、工作水头 H 和效率 η 等途径都可以改变水轮机动力矩。但在实际工程中,通过改变工作水头 H 和效率 η 来改变动力矩不仅十分困难,而且非常不经济,只有通过改变流量来调节水轮机动力矩才是最可行的途径。另外,不同型式的水轮机,其调节流量的机构是不相同的。例如,反击式水轮机中的混流式和斜流式水轮机是通过调节导叶开度来改变动力矩,冲击式水轮机是通过改变喷针行程来调节水轮机动力矩;而对于反击式水轮机中的轴流转桨式、斜流转桨式和贯流转桨式水轮机,则是通过协调控制导叶开度和桨叶转角来改变动力矩。综上所述,水轮机调节的主要途径是改变导叶或喷针开度来调节负荷或频率,或者是通过协调控制导叶开度和桨叶转角来调节负荷或频率。其具体方法是按照负荷变化所引起的机组转速或频率的偏差,调整水轮机导叶或喷针开度,或协调控制导叶开度和桨叶转角,使水轮机动力矩和发电机阻力矩及时恢复平衡,从而使转速和频率保持在规定的范围内。

三、水轮机调节的特点

水轮机调节系统与其他原动机调节系统相比具有以下特点:

(1) 水轮发电机组是以水为工作介质发电的,而水能开发受自然条件的限制,与其他原动机相比,其单位工作介质的能量较小,要发出相同的电能需要通过较大的流量,因此,水轮机的导水机构也相应较大。这就要求水轮机调速器设置多级液压放大元件,并具有较大的液压操作机构,而液压元件的非线性和时间滞后性会影响水轮机调节系统的动态品质。

(2) 因开发方式的不同,一些水轮机需要采用双重调节。例如,转桨式水轮机不仅要调节导叶开度,同时还要调节转轮桨叶的转角(对水斗式水轮机,不仅要调节喷针,还要调节折向器),这要求调速器中多设置一套调节机构,从而增加了调速系统的复杂性,同时也增加了水轮机出力调整的滞后。

(3) 受自然条件的限制,有些水电站具有较长的引水管道。管道长,水流惯性很大,水轮机突然开启或关闭导叶时,会引起压力管道中产生水击。而为了抑制管道中的水击压力上升,往往要限制导叶的关闭速度,即延长关机时间,这又可能会使机组转速过高,会对水轮机调节系统的动态品质产生不利影响。

(4) 随着电力系统容量的扩大和自动化水平的不断提高,对水轮机调速器的稳定性、速动性、准确性提出了越来越高的要求,调速器的操作功能、自动控制功能不断完善,已经成为水电站综合自动化必不可少的自动装置。

四、水轮机调速器的发展历程及趋势

最早的调速器是蒸汽机调速器,它是机械型的,利用测速元件直接控制进汽阀。水

轮机调速器是 20 世纪前期随着水电建设发展起来的, 19 世纪末出现了用液压放大元件作为功率放大的液压型调速器, 到 20 世纪 30 年代出现了相当完善的机械液压型调速器, 并沿用至今。

随着电子技术与液压技术的进步, 解决了电气—液压转换问题, 20 世纪 40 年代中期出现了电气液压型调速器。电气液压型调速器发展初期, 仅以电气回路替代一些机械元件, 直到电子调节器型调速器的出现, 电液调速器才有了独立的模式。从采用的元器件方面, 其发展经历了电子管、晶体管、集成电路等发展阶段。从调节规律来说, 由比例—积分调节规律发展到比例—积分—微分调节规律。我国生产的电液调速器品种繁多, 全国各大、中型水力发电设备厂几乎都有产品, 但是其不同时期和不同厂家的产品都有所不同, 比较典型的产品有 DT-100 型、JST-100 型、YDT-1800A 型等。

模拟式电液调速器的发展, 使水轮机调速器的性能有了较大提高, 但其故障率仍然较高。中国电力企业联合会对 40 个水电厂的 134 台水轮机调速器的调查显示, 调速器故障累计达 827 次。此外, 模拟电液调速器在动态特性、调节性能方面等还存在着较大缺陷。随着大容量水电机组的出现, 其运行的稳定性和对系统负荷变化的跟随性, 直接影响着电力系统的安全稳定运行, 这就需要性能更加优异的水轮机调速器来承担调节任务。

计算机技术、液压传动技术的发展, 为水轮机调速器技术的发展创造了条件。20 世纪 70 年代末, 世界上许多先进国家就开始致力于将计算机技术引入水轮机调节领域的研究。20 世纪 80 年代是水轮机调速器迅速发展的时期, 世界上发达国家的著名水轮机调速器公司都先后研制了微机调速器。日本是早期研究微机调速器的国家之一, 日立公司研制的微机调速器样机于 20 世纪 80 年代初应用于抽水蓄能机组。ABB 公司也起步较早, 其产品先后在我国福建沙溪口、贵州天生桥电站得到应用。法国奈尔皮克 (NEYPIC) 公司与我国高校华中理工大学签订了联合研制微机调速器协议, 推出了 DIGPID 数字调速器, 并在广州抽水蓄能机组上应用。此外, 德国西门子 (SIEMENS) 公司、奥地利伏依特 (VOITH) 公司、美国伍德华德 (WOODWARD) 公司等都先后推出了自己的产品。

我国从事微机调速器的研制开发的步伐与国外大体相同。华中理工大学于 1979~1981 年进行了微机调速器的理论研究, 并与武汉水电控制设备公司、天津水电控制设备厂协作, 于 1984 年 11 月研制成功我国第一台微机调速器, 并在湖南欧阳海电站投入运行。此后, 许多科研院所、高等院校和制造厂都进行了微机调速器的研究、制造工作。南京自动化研究所、中国水电科学研究院自动化所、长江控制设备研究所、天津电气传动设计研究所、河海大学、武汉水利电力大学、西安理工大学、东方电机厂、哈尔滨电机厂, 以及武汉事达电气股份有限公司、长江三峡能达电气有限责任公司等单位均先后开展了这方面的工作, 并取得了一定的成绩。

微机调速器技术发展十分迅速, 具体体现在以下几个方面:

(1) 涌现了各类具有自主知识产权的微机调速器, 并且在各种类型的大、中、小型电站上得到了广泛应用。从我国第一台微机调速器诞生到现在, 已经历了 20 多年的发



展,我国的调速器产品已从开始的仿制、联合研制发展到目前大量具有自主知识产权,应用范围覆盖了各类电站的各种机型,包括混流式、轴流式、贯流式和多喷嘴冲击式等;应用的电站有高水头、低水头和抽水蓄能电站,电站容量从几千千瓦到几百兆瓦等,如葛洲坝二江和大江发电厂单机 170、125MW 的轴流式机组,雅砻江二滩水电站单机 550MW 的混流式机组,乌江构皮滩水电站单机 600MW 的混流式机组,田湾河梯级电站单机 140、120MW 的六喷嘴冲击式机组,广西桥巩电站单机 56MW 的灯泡贯流式机组等。

(2) 水轮机调速器的系统结构采用电子调节器+电液随动系统的结构,代替了传统的缓冲式系统结构。这种新结构由主接力器的电气反馈构成闭环,主接力器没有机械反馈,或者有机械反馈但不参与自动调节,因而性能指标优越、适用范围广。该系统结构是当前和今后一段时期内水轮机调速器的主导模式。其次,电子调节器+电机转换装置+机械液压随动系统的结构具有手动、自动切换与手动操作方便、可靠的优点,适合于中小型调速器和主接力器反馈距离较短的大型调速器。

(3) 新型控制策略在水轮机调速器中得到了广泛应用。近年来,在调节规律方面,从常规 PID 规律发展到智能 PID 调节(即变结构、变参数 PID 调节),其基本调节规律虽仍是 PID 调节规律,但它可以根据不同的运行工况,自动改变调节器的结构和参数,因而能更好地满足电站的运行要求。除此之外,还开展了许多新型控制策略的研究,如自适应控制、最优 PID 控制、模糊控制、状态反馈控制、遗传算法控制等。上述研究均取得了一定的成果,有些已经在生产实践中得到应用。

(4) 采用了性能更优越、更可靠的计算机系统。在硬件方面,微机调节器采用过单片机、工业控制计算机、可编程控制器(PLC)和可编程计算机控制器(PCC)等。目前,PLC 在微机调速器产品中应用最为广泛,而以可编程控制器的升级产品 PCC 为硬件的微机调节器也已经投入运行。在编程语言方面,除采用梯形图编程方式外,还增加了不同类型的高级语言,如 Basic、C 等编程语言。

(5) 采用了标准液压元件、新型的电机和电液转换装置,提高了电液随动系统的可靠性。电液随动系统取消了杠杆机构和管路系统,代之以液压集成块和标准液压元件,用步进电机,交、直流伺服电机和比例伺服阀等取代了传统电液转换器,较好地解决了因油污引起的电液转换器发卡而导致机组溜负荷的问题,使机械柜结构变得十分简单、可靠,维护非常方便。此外,在一些大型机组上,采用了可靠性更高的带自复中功能的双机械冗余结构,如步进/伺服电机+比例阀结构、双比例伺服阀结构等。

(6) 高油压在调速器上得到了应用。现代液压技术的重要特征之一是具有较高的工作油压。1994 年,我国开始研制以电液比例控制及标准液压件为特征的高油压电液调速器。1997 年初,第一台工作油压达 16MPa 的高油压微机调速器在四川都江堰的双柏电站投入运行,并迅速得到推广,显示了蓬勃的生命力及良好的发展前景,代表了现代调速器机械液压部分的发展趋势。

(7) 微机调速器的综合性能不断提高,功能日趋完善。微机调节器可根据机组单机运行、并网运行等不同工况的需要,采取不同的控制方式,如频率调节模式、功率调节

模式和开度调节模式等，并能按水位自动调节启动开度、空载开度，实现了故障在线报警、自诊断和通信功能等。

第二节 水轮机调速系统基本工作原理

本节以机械液压型调速器为例介绍水轮机调速系统的基本原理。

图 1-3 为单调节水轮机调速系统框图。该系统由被控对象、测量元件、液压放大元件和反馈控制元件等组成，其调节过程是：当用户负荷变化时，引起被控制对象水轮发电机组转速改变，测量元件——离心摆检测到转速的变化后发出调节信号，并按照一定的调节规律控制导水机构，改变导叶开度，调节进入水轮机的流量，使机组转速恢复稳定。为了讲清楚调速系统的工作原理，下面先介绍其主要元件的结构及工作原理。

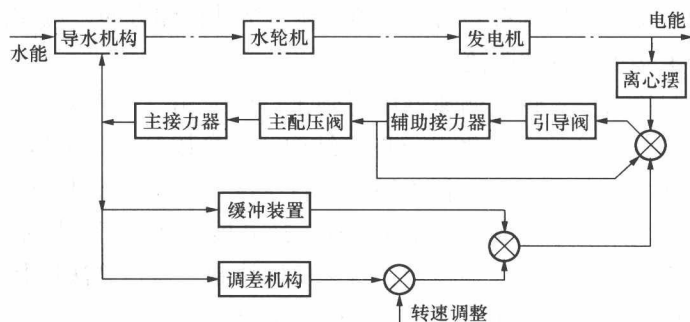


图 1-3 单调节水轮机调速系统框图

一、转速测量元件及其工作原理

调速系统中的测量元件是离心摆，其结构如图 1-4 所示，由上支持块、下支持块、菱形钢带、两个重块、弹簧和调节螺母等组成。离心摆由交流电动机带动旋转，交流电动机的电源来自与发电机同轴的永磁发电机，其频率反映了机组的转速；当机组转速变化时，离心摆转速也随之变化，并将转速变化量转化为位移量，去控制液压放大元件。下面说明离心摆测量转速的原理。

离心摆有左右两个重块，经钢带、上支持块与电动机转轴相连。钢带下部与下支持块连接，下支持块与转轴之间有一弹簧和调节螺母，下支持块又与引导阀转动套连为一体。当机组以额定转速运行时，电动机带动离心摆转动，离心摆的重块产生离心力使钢带张开，下支持块上移使弹簧压缩，并在某一位置达到平衡状态，即作用于离心摆的离心力、液摩阻力、弹簧阻力和重力等相平衡，离心摆处于某一转速稳定运行。这时转动套也处于某一相对中间位置与离心摆一起转动，如图 1-4 (a) 所示。若此时转速上升，重块的离心力也随之增大，于是克服弹簧阻力带动下支持块上移，如图 1-4 (b) 所示；若此时转速下降，重块的离心力随之减小，由于弹簧回复力的作用，使下支持块下移，如图 1-4 (c) 所示。由此可见，下支持块随转速的变化而上下移动。所以，离心摆的输入信号是转速，输出信号是下支持块的位移。

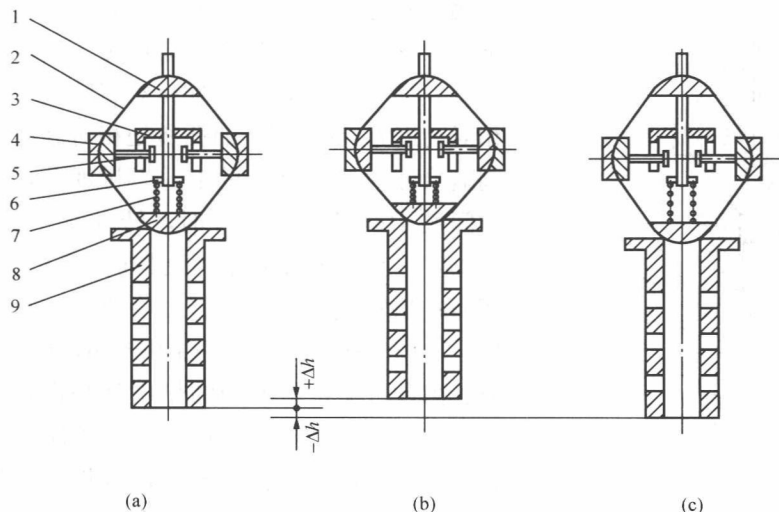


图 1-4 离心摆结构及动作原理图

1—上支持块；2—钢带；3—导板；4—重块；5—限拉螺钉；
6—调整螺母；7—弹簧；8—下支持块；9—转动套

如果忽略惯性力和液摩阻力，离心摆的输出信号与输入信号之间呈正比关系，可用式 (1-5) 表示为

$$\begin{aligned}\Delta L &= K_f x \\ x &= \Delta\omega/\omega\end{aligned}\quad (1-5)$$

式中 ΔL ——下支持块的位移量；

K_f ——离心摆放大系数；

x ——转速变化量的相对值。

式 (1-5) 称为离心摆静态方程式。它表明，若把下支持块的位移量 ΔL 看成离心摆的输出量，而把转速变化量的相对值 x 看成输入量，则离心摆的输出量与输入量成比例。在稳定工况下，离心摆的转速 n 与转动套的行程 L 之间的关系曲线如图 1-5 所示，称为离心摆静特性曲线。

二、液压放大元件及其工作原理

(一) 引导阀

测速元件的操作力很小，需要液压放大装置对微小操作力进行放大再去操作导水机构，引导阀就是液压放大装置的元件之一。

引导阀由阀壳、转动套和针塞组成，如图 1-6 所示。如上所述，转动套与离心摆下支持块连成整体，其位置的高低反映了转速的大小。转动套上开有 3 排油孔，上排油孔与压力油相通，中排油孔通过油管与辅助接力器上腔相连，下排油孔与排油相接。引

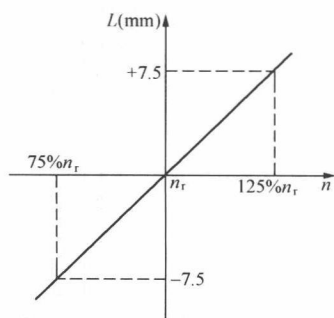


图 1-5 离心摆静特性曲线
 n_r —额定转速

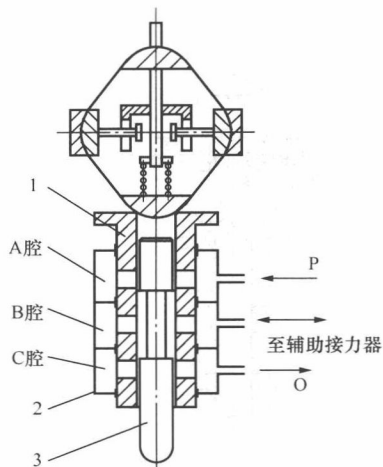


图 1-6 引导阀结构组成

1—转动套；2—阀壳；3—引导阀针塞

压阀活塞的运动。

通过引导阀的油流量 Q 与针塞阀盘和转动套的相对位移 Δh 有关，其关系如下

$$Q = v\Delta S = vb\Delta h \quad (1-6)$$

式中 v ——转动套窗口的油流速度；

ΔS ——引导阀窗口开度；

b ——转动套窗口宽度；

Δh ——针塞阀盘与转动套窗口的相对位移。

式 (1-6) 表明，引导阀输出流量 Q 与引导阀窗口开度 ΔS 成正比。

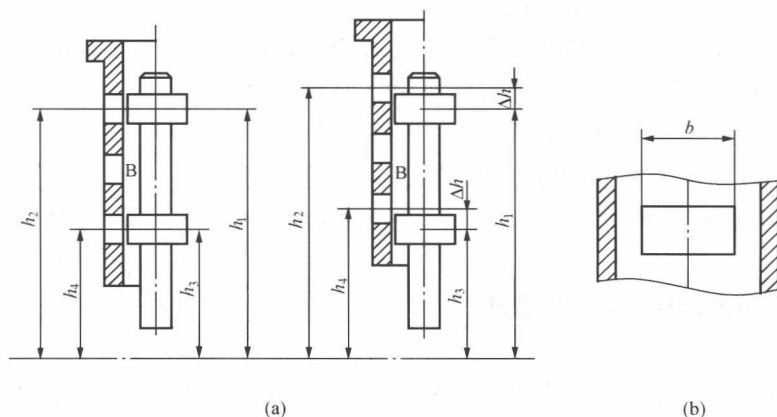


图 1-7 引导阀工作原理示意

(a) 工作原理图；(b) 引导阀窗口

(二) 辅助接力器与主配压阀

辅助接力器与主配压阀装在同一阀壳内，其结构如图 1-8 所示，由阀壳、辅助接

力器活塞和主配压阀活塞组成。

辅助接力器活塞是差动活塞，即活塞上、下表面积不同，活塞的下腔接排油管，压力为零，其上表面的环形面积 A_1 受来自引导阀的油压 p_1 的作用，因此活塞受到一个向下的作用力，其值等于

$$F_1 = p_1 A_1$$

式中 F_1 ——作用于活塞上表面的油压力。

主配压阀壳体上开有 3 个排油孔，中排油孔与压力油源相连，上、下排油孔与主接力器活塞左、右油腔相通。主配压阀活塞有上、下两个阀盘，上阀盘下表面积 A_2 大于下阀盘上表面积 A_3 。压力油从壳体中间油孔进入，使两个阀盘均受到油压作用，上、下阀盘所受作用力方向相反，因上阀盘的下表面积大于下阀盘的上表面积，所以总作用力方向朝上，如图 1-8 所示，其值为

$$F = p(A_2 - A_3)$$

式中 F ——作用于主配压阀活塞上的合力；

p ——上、下阀盘之间的压力油压强；

A_2 、 A_3 ——上、下阀盘的受压面积。

辅助接力器与主配压阀连为整体时，其状态取决于 F_1 和 F 的对比。当引导阀处于平衡状态时， $p_1 A_1 = p(A_2 - A_3)$ ，辅助接力器与主配压阀不动；当转速升高，引导阀接通排油时， $p_1 = 0$ ，在 F 作用下辅助接力器与主配压阀上移，压力油进入主接力器左腔；当转速降低，引导阀接通压力油时， $p_1 = p$ ，因 $A_1 > A_2 - A_3$ ，所以 $F_1 > F$ ，辅助接力器与主配压阀下移，压力油进入主接力器右腔，从而控制主接力器活塞左右移动。

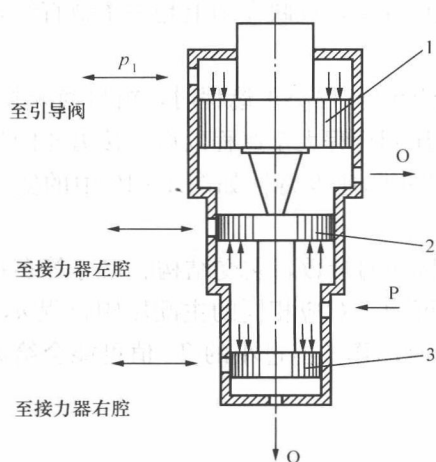


图 1-8 辅助接力器与主配压阀结构原理示意

1—辅助接力器；2—主配压阀上阀盘；

3—主配压阀下阀盘

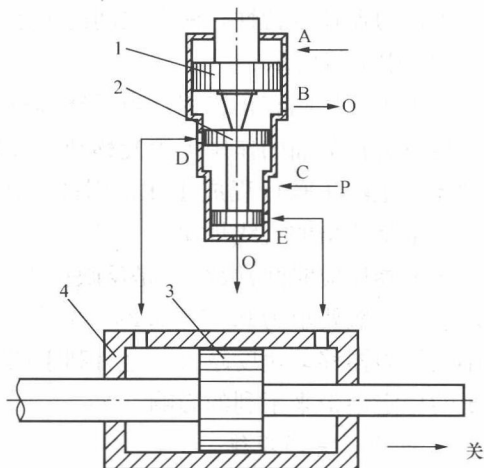


图 1-9 主接力器工作原理图

1—辅助接力器活塞；2—主配压阀活塞；

3—接力器活塞；4—接力器缸体

（三）接力器

主接力器由接力器缸体、活塞、活塞杆等组成，其活塞两端的油孔分别与主配压阀

上、下控制油孔连接,受主配压阀活塞控制,如图 1-9 所示。当主配压阀活塞向上移动时,主接力器左腔进压力油,右腔通排油,接力器活塞向右(关闭侧)移动,导水机构关小导叶开度。若主配压阀活塞向下移动,则接力器向左移动,导水机构开大导叶开度。

接力器活塞移动速度的大小,取决于主配压阀控制油口的开度大小和时间长短。设接力器位移为输出量,主配压阀控制油口的开度为输入量,则两者之间的关系式为

$$y = \frac{1}{T_y} \int u dt \quad (1-7)$$

式中 y ——接力器位移量的相对值, y 等于接力器活塞位移量 ΔY 与接力器活塞最大位移量 Y_M 的比值;

T_y ——接力器反应时间,表示当频率变化 $100\% f_r$ 时,配压阀对应的最大开口下,接力器活塞走完全行程所用的时间;

u ——配压阀控制油口开度相对值,等于配压阀活塞行程 ΔS 与配压阀最大行程 S_M 的比值。

式(1-7)表明,接力器位移量的相对值 y 与配压阀控制油口开度相对值 u 的积分成正比。

(四) 液压放大机构的特性

1. 接力器的速度特性

将式(1-7)微分,得到式(1-8),即

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_y} u \quad (1-8)$$

式(1-8)表明,接力器活塞的移动速度取决于主配压阀窗口开度相对值。这一特性称为接力器速度特性,两者之间的关系是正比例规律,反映在图上是一条斜直线,如图 1-10 中虚线所示。

由于主配压阀有正遮程,当活塞离开中间位置但行程小于遮程时,窗口尚未打开,接力器只会在漏油的作用下缓慢移动,直到主配压阀行程大于遮程以后,接力器的移动速度才与主配压阀行程成正比。因此,接力器的实际速度特性如图 1-10 中的实线所示,并不是严格的直线规律。

接力器反应时间常数 T_y 是反映接力器速度特性的参数,它受结构、尺寸等多种因素影响,一般要求为 $0.05 \sim 0.2s$ 。由式(1-8)可知,对应相同的主配压阀行程 u , T_y 越小则接力器移动速度越大,这有利于调速器及时动作。但过小的 T_y 值可能会给调节系统的稳定性带来不利的影响。

2. 接力器关闭规律

接力器从全开到全关的过程中,要经过启动、加速、匀速移动和减缓等几个阶段,实际的关闭规律如图 1-11 所示。

(1) 接力器不动时间 T_q 。导水机构及调速器运动部件都有惯性,液压放大机构中油的流动也需要一定时间,因此接力器的动作总是滞后于离心摆,接力器启动后还要逐步加速到正常移动速度。接力器滞后及加速所用的时间用 T_q 表示,称为接力器不动时间,如图 1-11 所示。国家标准对机组甩负荷后的不动时间 T_q 有严格规定,将在后续