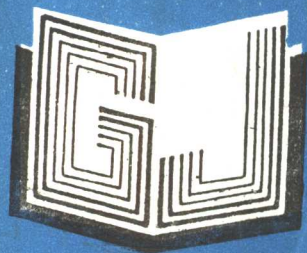
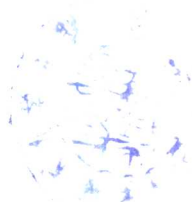


988960



高等学校教材

专科适用



水轮机调节

长春水利电力高等专科学校 田毅

武汉水利电力大学 黄奕华

合编

0.7



955960

高等学校教材

//////////////////// 专 科 适 用 //////////////////////////////////////

水 轮 机 调 节

长春水利电力高等专科学校 田毅
武汉水利电力大学 黄奕华 合编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书为水利电力类高等专科学校水电站动力专业的“水轮机调节”课程统编教材。

本书主要内容有：水轮机调节的基本知识；机械及电气液压调速器结构原理、工作特性和参数计算；水轮机调节系统动态分析；调速器装修、运行和故障处理；油压设备结构原理；调节保证计算和调速设备选择。

本书除用于教材外，还可作为从事水轮机调节工作的工程技术人员和技术工人的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水轮机调节/田毅, 黄奕华编. —北京: 中国水利水电出版社, 1996

高等学校教材: 专科适用

ISBN 7-80124-121-5

I. 水… II. ①田…②黄… III. 水轮机-调节 IV. TK730.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 00191 号

书 名	高等学校教材 (专科适用) 水轮机调节
作 者	长春水利电力高等专科学校 田毅 合编 武汉水利电力大学 黄奕华
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市密云红光照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 21 印张 491 千字 3 插页
版 次	1996 年 10 月第一版 1996 年 10 月北京第一次印刷
印 数	0001—1370 册
定 价	16.40 元

前 言

本书是根据 1988 年 7 月于江西庐山召开的“高等专科教学研究会”精神及在专业教材编审会上确定的水动专业《水轮机调节》教材编写大纲而编写的。

本书选材，遵循专科教育特点培养实用型高级专门工程技术人才，着眼于工程施工与生产实践技术，使学生获得较强的实践工艺技能和足够的实用理论研究与分析计算的基本训练。故在素材上，吸取了多年来的科研、设计、装修和运行以及教学等方面一些丰富的实践经验。

本书除用作专业教材外，还可作为从事水轮机调节工作的调速器安装、检修、调试和运行等方面的工程技术人员和技术工人的参考书。

全书共分七章，第一、二、五、六章由长春水利电力高等专科学校田毅同志编写；第三章的一至九节和第四章由武汉水利电力学院黄奕华同志编写；第三章的第十和十一节由武汉水利电力学院蔡维由同志编写；第七章由长春水利电力高等专科学校罗南华同志编写。全书由田毅同志统稿。

全书由华中理工大学教授叶鲁卿同志主审，审稿中提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于我们学识水平有限，书中难免存在错误和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

1992 年 11 月

目 录

前 言

第一章	水轮机调节的基本知识	1
第一节	概述	1
第二节	水轮机调节的基本任务	1
第三节	水轮机调节的基本方法和特点	4
第四节	调节对象的力矩特性和惯性	6
第五节	水轮机调节系统原理	12
第六节	具有两级液压放大和控制装置的调速系统原理	23
第七节	双重调节调速系统原理	27
第八节	调节系统的静态特性和动态特性	33
第九节	调速器的分类和型谱	38
第二章	机械液压调速器	44
第一节	测速元件	44
第二节	液压放大元件	53
第三节	硬反馈元件	74
第四节	软反馈元件	81
第五节	控制机构(或装置)	95
第六节	双调协联装置	99
第七节	调速器与机组静态特性	101
第八节	典型机械液压调速器系统工作原理	104
第三章	电气液压调速器	119
第一节	测频回路	119
第二节	测频微分回路	135
第三节	软反馈回路	137
第四节	调差、功率给定回路	142
第五节	综合放大回路	145
第六节	电气开度限制回路	149
第七节	电气协联函数发生器	151
第八节	电液转换器	157
第九节	YDT-1800型电液调速器及其调整试验	162
第十节	JST-100型电气液压型调速器及其调整试验	174
第十一节	微机调速器原理简介	182
第四章	水轮机调节系统动态分析	191
第一节	调节系统动态分析的数学基础	191
第二节	典型环节的阶跃响应和频率特性	202

第三节	调节系统的方块图及其简化	215
第四节	自动调节系统的稳定判断	218
第五节	调节系统的校正	221
第六节	调节对象的动态特性	225
第七节	调速器的动态特性	237
第八节	水轮机调节系统稳定性分析及调速器运行参数的选择	245
第五章	调速器的布置、装修、调试、运行和故障分析	253
第一节	调速器的布置方式	253
第二节	调速器运行与维修	257
第三节	调速器的调整和静态特性试验	259
第四节	水轮机调节系统的动态特性试验	264
第五节	调速器故障分析与处理	269
第六章	油压装置	278
第一节	油压装置的用途、组成和工作原理	278
第二节	压力油罐的结构原理和容积计算	282
第三节	油泵的用途和结构原理	286
第四节	安全阀、逆止阀、旁通阀及阀组	287
第五节	集油箱结构和附件	292
第六节	油压装置的调试和故障分析	293
第七章	调节保证计算及调速器选择	296
第一节	调节保证计算的概述	296
第二节	水击压力上升值计算	298
第三节	最大速率上升值计算	310
第四节	调节保证计算的步骤与实例	315
第五节	减小水击压力及速率上升的措施	321
第六节	调速器的选择	324

第一章 水轮机调节的基本知识

所谓水轮机调节，是指在自动调节装置（调速器）控制下的水轮发电机组，按照预定的功能、性能和程序完成电能生产的调节及控制过程。

第一节 概 述

人们从生产实践中知道，为了提高生产效益和减轻笨重的体力劳动，必须不断地改进生产工具，增强对原动机的自动调节能力。早在 18 世纪初期，人们就创造了粉磨平衡器、时钟控制器。1765 年俄国人波尔祖诺夫制成了锅炉水位调节器。1774 年英国人瓦特又制成了蒸汽机调节器。自 19 世纪后期，在水力发电原动机—水轮机上采用了水力驱动的离心调速器，随后在瑞士又采用了油压式离心调速器控制水轮发电机组。到 20 世纪初，水轮机调速器已发展成具有复原、缓冲和控制等机构较全的水轮机自动调节装置。

本世纪中期以来，随着自动调节技术和电子技术的飞跃发展，水轮机调节技术也在不断地改进和更新。1944 年世界上第一台电气调速器首先在瑞士问世。1949 年新中国建立后，我国人民在中国共产党领导下，奋发图强地大兴水利，水轮机调速器的研究与制造业得到了日新月异的发展，生产了多种类型的机械、电气调速器，不仅满足国内需要还支援了亚、非和美洲等一些国家的水电建设。近年来，我国已成功的研制了电脑控制的新型微机调速器，并应用于电力生产。

现代的水轮机调速器，除完成水轮发电机组生产过程的自动调节任务外，还可对机组的启动、并列、停机和有关故障处理等各种工况的控制，已成为具有多功能的水轮机自动调节装置。可见，水轮机调节是建立在自动调节理论基础上的—门自动调节与控制的专业技术。它主要研究调速器和调速器与被调对象组成的水轮机调节系统的静态和动态特性，为保证机组和电力系统运行的安全、稳定以及提高自动化水平和经济效益服务。

第二节 水轮机调节的基本任务

一、水轮机调节的任务

水轮发电机组（简称机组）是把水能变成电能，再经输电网络将电能送给用户使用。在这个过程中，从发电到用电之间的输电网络等既不储存电能也不生产电能，而电能是随发随用的。如果忽略网络等损失，发电机输出的电功率应等于用户需要的电功率。

在发电量与用电量相等的情况下，电能的频率与电压均为恒定的常数，并满足各自的规定。根据 1983 年《全国供用电规则》对电能质量标准的规定：

电力系统频率为 50Hz（周/秒），其允许偏差为电网容量在 3000MW 及以上者为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，电网容量在 3000MW 以下者为 $\pm 0.5\text{Hz}$ ；

电力系统内用户端电压变动幅值的允许范围：35kV 及其以上供电和对电压有特殊要求的用户为额定电压的 $\pm 5\%$ ；10kV 及以下高压和低压用户为额定电压的 $\pm 7\%$ ；低压照明用户为额定电压的 $+5\% \sim -10\%$ 。

所述电能质量的电压稳定问题，应由发电机的励磁装置进行调节和保证，这里不予多述。但须指出：一般情况下频率变化 1% 可引起电压变化 $1\% \sim 2\%$ ，而电压变化也将引起频率不稳定。所以励磁系统不稳定又可导致水轮机调节工况变坏，这是应予注意的。

因用户的负荷经常在变化故对电能质量作上述规定和要求。随着用电设备的投入或切除和故障等原因的干扰，负荷经常不断地在变化，大电力系统可达总容量的 $2\% \sim 3\%$ 。这种变化对发电机来说是不可预见的。因此，经常使发电与用电之间的电能量的力矩由平衡变为不平衡，而引起发电机或机组旋转角速度发生变化，并导致供电或用电频率变化。

交流电机的频率与转速的关系式

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

式中 f ——发电机输出频率；

p ——发电机磁极对数；

n ——发电机转速。

从式(1-1)可知，磁极对数不变，转速 n 与频率 f 成正比关系，即水轮发电机组的频率随其转速的增减而增减。同时，水轮发电机的转速又随着水轮机的流量变化对主轴产生的力矩变化而变化，这种转速变化可导致发电机或用电频率变化。

当频率变化偏离额定值过大时，会使电动机转速超出允许的的稳定范围或其他用电设备运行工况变坏，就势必影响到工厂、矿山、机关和学校等各类用电户的产品质量。例如：机床加工件表面不光滑；纺织机纺出的线条粗细不均匀；广播电视音像失真等等。而对一些重要生产部门，如化工、冶炼、国防和医疗等影响更大。故各类用电户对频率精度都有其各自不同的要求。

可见，保证水轮发电机组和电力系统的频率稳定在规定偏差的范围之内，具有重要的实际意义。而这个任务，通常是水轮发电机组在调速器控制下完成的。所以，水轮机调节的基本任务是：按照用户负荷变化引起的机组转速（或频率）变化，调节进入水轮机的流量（即水能），改变发电机输出的有功功率（即电能），适应用户负荷变化的要求，以达到随时维持发电与用电的电力平衡，确保供用电频率 50Hz 及其偏差不超过允许范围。

二、水轮机调节系统及其各部分功用

1. 水轮机调节系统

一般的说，调节系统是指调节器与被调对象组成的系统。而水轮机调节系统是指由调速系统和被控制系统组成的闭环系统；被控制系统是由过水系统、水轮机、发电机和电力网络组成的，又称被控（调）对象；调速系统是由用来检测转速的元件和将被检测的转速按一定特性转换成主接力器偏差的一些环节组成的，是调速器的核心部分，如图1-1。

图1-1为水力发电厂水轮机调节系统工作过程原理示意图。按图示，上游水库的水经引水管道、导水叶进入水轮机，而后顺着尾水管排到下游。水轮机将水能转变成机械能，使

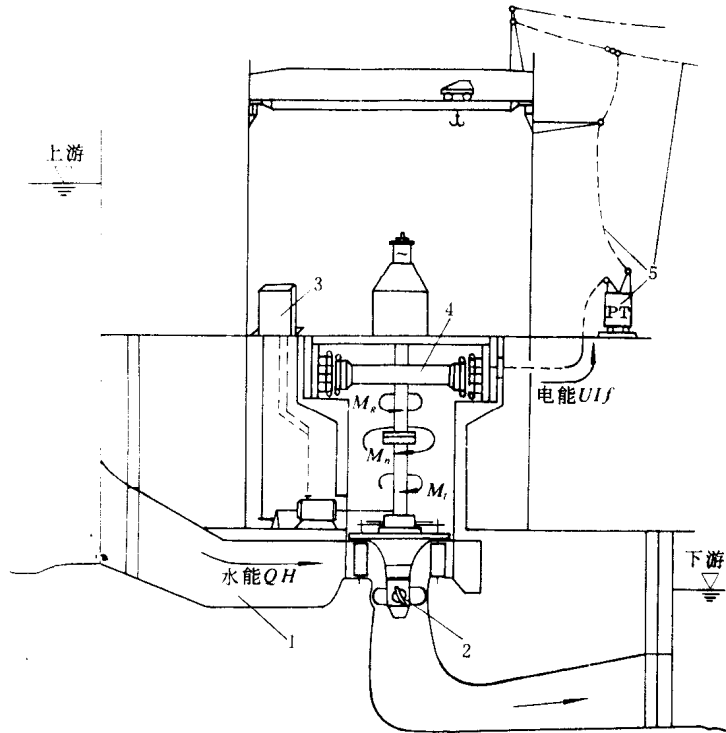


图 1-1 水轮机调节系统原理图

1—过水系统；2—水轮机；3—调速器；4—发电机；5—电力网络

机组转动并产生动力矩，由主轴传给发电机并产生电能，再经电力网络将电能送给用户。当用户负荷变动引起机组转速（或频率）变化时，通过机组带动的永磁发电机或直接把频率变化信号传给调速器，于是调速器便相应地控制导水叶开度，改变进入水轮机的流量，使发电机输出的电能（有功功率）量与用户需要负荷量相应即平衡，以保持频率恒定不变。此外，还可以人为地直接控制调速器改变导水叶开度，使机组增减负荷或开停机等，实现各种工况的人工控制。

2. 水轮机调节系统的各部分功用

图 1-2 为水轮机调节系统功能块图或方块图，又叫功能框图或方框图。它表示了图 1-1 中不同功能的各个部分及其相互关系。现分别说明如下。

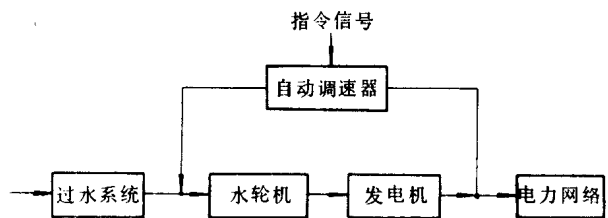


图 1-2 水轮机调节系统方块图

(1) 被控制部分。

过水系统——将上游水库或河道

中的水引入水轮机，做功后再排到下游去；

水轮机——将水能变成机械能（转速和力矩），再经主轴传给发电机；

发电机——将机械能（旋转力矩）变成电能（有功功率）送给电网；

电力网络——将发电机输出的电能（有功功率）送给用户使用。

(2) 调速器。调速器是水轮机调节系统中的自动调节与控制装置。对机组的运行，既能自动调节又可用人工手动控制。

在单机或调频机运行中，调速器能随机组转速（频率）变化相应地自动控制导水叶开度，改变进入水轮机的流量和发电机的输出功率，满足用户负荷变化的要求，维持机组转速和频率恒定不变；在并列机运行中，调速器能随电网同期转速变化按调差率自动调整机组负荷，保证并列机组间的负荷合理分配；在调速器自动控制机组时，可用人工操作转速调整（频给或功给）装置改变单机转速或并列机负荷，还可用开度限制机构限制机组负荷、减小机组负荷或停机；在调速器手动控制机组时，可用人工操作开度限制机构，实现开机、增减负荷和停机；在现代调速器中，由于设有多种功能元件或装置，可实现电站的单机、成组和梯级调节等等各种形式的高度自动化。

第三节 水轮机调节的基本方法和特点

一、水轮机调节的基本方法

1. 水轮机调节的途径

水力发电是通过一定量水的流量从一定高度落下，经引水道推动水轮机旋转做功，即把位能变成机械能，再由发电机将机械能转换为电能。这表明水的重量及其下落高度是水力发电的基本因素（参见图 1-1）。

水轮机出力计算式

$$N_h = \gamma Q H \eta \quad (1-2)$$

式中 γ ——水的重度， N/m^3 ；

Q ——通过水轮机的流量， m^3/s ；

H ——水轮机的工作水头， m ；

η ——水轮机的效率。

式 (1-2) 中， γ 和 η 一般可认为常数，而 H 是不易改变的，只有 Q 值可通过导叶开度进行调整，并且经济可行、实施方便。所以，通常以调整水轮机的流量改变发电机的有功功率，作为水轮机调节的唯一途径。

2. 机组的能量转换与平衡力矩

水流能量的调整是通过改变水轮机的水门即导水叶开度来实现的。将导叶全开时进入水轮机的水流能量称为输入的总能量。这个总能量在实际中并非全部变成电能，因为发电机在输出电能以前，机组转速必须首先达到与电能额定频率（50Hz）相应的额定转速。故导叶开度由零到空载（无负荷）开度，进入水轮机的水流只是使机组旋转并达到额定转速；而后随用户负荷增加，导叶从空载开度再开大到所增加的流量时所对应的开度，才使发电机产生电能，以至导叶开度全开使发电机输出电能最大。但此时总能量还没有全部转变成转速和电能，仍有较小部分因水轮机漏水、机组旋转摩擦阻和发电机发热等等的损失而消耗掉。如果忽略了损失，就可认为总能量全部转换成了转速和电能，而在正常工况下三者保持着平衡与稳定状态。为了便于分析，通常以力矩形式表示它们的转换过程。

根据动力学原理，水轮机的出力 N_h 、旋转角速度 ω 与其转动力矩 M 之间应有如下关系

$$M = \frac{N_h}{\omega} = \frac{\gamma Q H \eta}{\omega} \quad (1-3)$$

M 是由水流的总能量通过水轮机转换来的水轮机的总力矩，可由模型水轮机试验数据换算出来。总力矩 M 中的一小部分用于推动机组旋转，称为旋转力矩 M_n ；余下的大部分叫作水轮机动力矩，并以 M_t 表示如下

$$M_t = M - M_n$$

或

$$M = M_t + M_n \quad (1-4)$$

按照图 1-1 所示，水轮机动力矩 M_t 经主轴传递使发电机产生电能（有功功率）并送给用户推动带电设备工作。而带电设备对发电机便产生一个与电能力矩或水轮机动力矩 M_t 大小相等方向相反的反力矩，一般称为发电机负荷阻力矩，又叫负荷力矩或阻力矩，并以 M_g 表示如下

$$(-M_g) = M - M_n$$

或

$$M = (-M_g) + M_n \quad (1-5)$$

将式 (1-4) 和式 (1-5) 相比较，由于水轮机与发电机的旋转力矩 M_n 相等，所以

$$M_t = M_g \quad (1-6)$$

可见，机组在正常的稳定状态下运行时，水轮机动力矩 M_t 与发电机阻力矩 M_g 大小相等方向相反，二者保持平衡，称它们为平衡力矩。

在上述情况下，如果用户负荷减小， M_g 也减小。当 M_g 减小到 M_{g1} 时，便有 $M_t > M_{g1}$ ， $M_t - M_{g1} = \Delta M_{t1}$ ，此时产生了多余的动力矩 ΔM_{t1} ，并使机组转速升高。调整调速器将水轮机流量减小，使多余的动力矩 ΔM_{t1} 全部减掉到零，即 $M_t - \Delta M_{t1} = M_{t1} = M_{g1}$ ，力矩就平衡了，机组便恢复到原转速保持稳定。若用户负荷增大， M_g 也增大。当 M_g 增加到 M_{g2} 时，便有 $M_t < M_{g2}$ ， $M_t - M_{g2} = \Delta M_{t2}$ ，产生了不足的动力矩 ΔM_{t2} ，并使机组转速降低。调整调速器将水轮机流量增大，使不足的动力矩 ΔM_{t2} 全部补充上，即 $M_t + \Delta M_{t2} = M_{t2} = M_{g2}$ ，力矩达到平衡，机组便恢复到原转速保持稳定。

由此表明，水轮机调节的基本方法是由调速器控制来改变水轮机流量，满足用户需要的负荷量，维持机组的力矩平衡和转速恒定不变。

二、水轮机调节的特点

由于水力发电是利用山川河流的自然条件，并加以人工修整使水流获得一定落差和流量实现的，所以落差从几米到数百米甚至一二千米不等，而流量差距也相当大。为了适应不同的水力发电条件，水轮机具有大小不一和截然不同的结构型式。水轮机调节与其他原动机调节相比较，水轮机调节有如下几个主要特点。

(1) 水轮机出力的基本因素是水头（落差）和流量，常用水头一般在十几米至一百几十米，对水轮机叶片压力只有一点几 MPa 到十几 MPa。要使水轮机产生较大的出力，就必须通过相当大的流量，而增大水轮机及其导水机构的结构尺寸。这就要求推动导水机构的调速器应有足够大的操作能力，所以水轮机调速器均设有外加能源的多级液压放大系统，并使执行元件的惯性增加，不利于调节。

(2) 水电站通常利用过水管道将水流引入水轮机和排出尾水。由水力学知道，当导叶（水门）开度变化较快时，管道内水流惯性会引起难以避免的水击（锤）效应，它与调节作

用相反并恶化调节过程；而且具有尺寸较大和体积笨重的水轮发电机组也存在相当的惯性，它虽然有助于机组稳定作用，但又使转速变化滞后而不利于调节。可见，水流和机组惯性对调节过程的影响是个复杂的问题。为了改善和提高调节性能，保证调节稳定性和调节品质，在水轮机调速器中均设有校正元件（如缓冲器和微分环节等）形成相当的调节规律，以达到最佳调节。

(3) 由自然条件决定的水电站的利用水头高低不一，而使水轮机结构型式差异也很大。高水头冲击式水轮机引水管道长，为防止针阀快速关闭时管道内水压过大或机组转速过高，通常将针阀关闭速度减慢，并由专设的截流板把射向水轮机转轮的柱形水流及时快速地截掉；低水头轴流式水轮机水头变幅大，当水轮机桨叶角度按照某种适宜关系随水头和导叶开度变化而变化时，便可获得最佳的水轮机工作效率，故对大型轴流式水轮机均设有按某一关系改变桨叶角度的调整机构，通常称为协联机构；水头较高的混流式水轮机，当导叶快速关闭时易于引起蜗壳内水压上升过高，故常设有由调速器控制的蜗壳放水（或减压）阀，又称调压阀。所以，水轮机调速器还具备双重调整能力的执行机构。

(4) 水轮发电机组具有操作简便，启动、停机快，负荷变动迅速和能源耗量小的优点。有利于实现单机、成组和全厂调频，而电力系统调频任务通常由水电厂承担。所以，水轮机调速器应具有灵敏度高、动作速度快和高度自动化的自动控制能力。

总的说，水轮机调节不仅要完成正常和特殊的调节任务，还要克服各种不利于调节的因素。要求调速器具备灵敏、准确、动作快、功能多和操作能力大的特点。所以，现代的水轮机调速器已成为机、电和液压联合的结构较为复杂的自动控制装置。

第四节 调节对象的力矩特性和惯性

实现水轮机调节的任务，必须正确地使用调速器和合理控制调节对象。为此，首先要了解调节对象的基本特性，然后才能正确的掌握、选择调速器和确定最佳的使用参数，取得令人满意的调节效果。

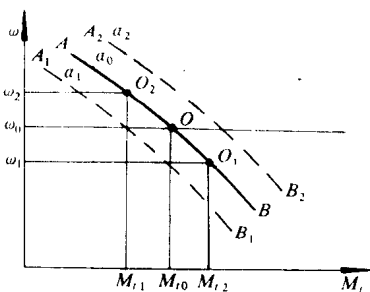


图 1-3 水轮机力矩特性曲线

一、水轮机力矩特性

水轮机力矩是指导叶开度 α 为某一值和水头 H 不变的情况下，水轮机的旋转角速度 ω 与其动力矩 M_t 之间的变化关系，由 $M_t = f(\omega)$ 来表示。

由于 $M_t = \gamma Q H \eta / \omega$ ，当导叶开度一定，即水轮机流量不变时， M_t 随 ω 的增大而减小或者 M_t 随 ω 的减小而增大，如图 1-3 中的 AB 线。

假定 O 点为原运行平衡点，其对应的动力矩为 M_{t0} 和角速度为 ω_0 ，当 ω 升高或降低时，就使 M_t 减小或增大， O 点沿 AB 线向左上方或向右下方移动。当稳定在 O_2 点或 O_1 点时，所对应的 M_t 和 ω 分别为 M_{t1} 与 ω_2 或 M_{t2} 与 ω_1 。

当导叶开度由 α_0 增大到 α_2 或减小到 α_1 时，曲线的基本趋势不变，只是 AB 线移到 A_2B_2

或 A_1B_1 。

本特性曲线的实际曲线可由水轮机综合特性曲线或模型试验数据换算绘制。

二、发电机负荷特性

发电机负荷特性是指所带负荷 P 为某一值不变的情况下，发电机的旋转角速度 ω 与其负荷力矩 M_g 之间的变化关系，由 $M_g = f(\omega)$ 来表示。

由于 M_g 是带电设备对发电机的反力矩，即发电机定子对转子的阻力矩，所以它的变化大小主要决定于各类用户的负荷性质(如电阻、电感和电容)。负荷性质不同，使得 M_g 与 ω 变化关系的差异很大，而且较为复杂。但一般地说，任何电网均包括有各类用户，其负荷性质都较全，故综合后的 M_g 随 ω 的增加而增加或者 M_g 随 ω 的减小而减小，如图 1-4 中的 CD 线。

假定 O 点为原运行平衡点，其对应的负荷力矩为 M_{g0} 和角速度为 ω_0 。当 ω 升高或降低就使 M_g 增大或减小， O 点沿 CD 线向右上方或左下方移动。当稳定在 O_2 点或 O_1 点时，所对应的 M_g 和 ω 分别为 M_{g2} 与 ω_2 或 M_{g1} 与 ω_1 。

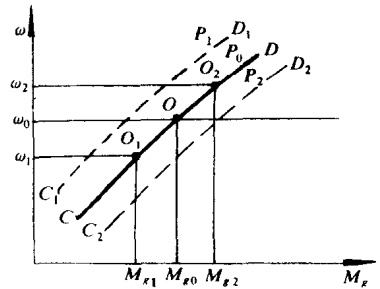


图 1-4 发电机负荷特性曲线

当用户负荷由 P_0 增加到 P_2 或减小到 P_1 时，曲线的趋向不变， CD 线移到 C_2D_2 或 C_1D_1 。

三、机组力矩特性和运动方程

机组是水轮机与发电机的组合体，在实际运行中二者通常有共同的角速度 ω ，而水轮机动力矩 M_t 与发电机负荷力矩 M_g 大小相等、方向相反，并以力偶的形式维持机组平衡和转速稳定。所以水轮机与发电机特性的综合特性即为机组的力矩特性，如图 1-5，并由 $M_{tg} = f(\omega)$ 来表示。

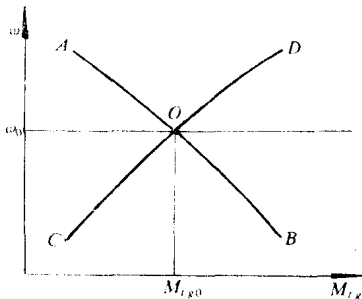


图 1-5 机组力矩特性曲线

在图 1-5 中，两条力矩特性曲线相交处的 O 点，即为机组运行的平衡点，它所对应的合力矩为 $M_{tg0} = M_t - M_g$ ，角速度为 ω_0 。

按动力学原理，将水轮发电机组看成是绕定轴旋转运动的刚体，其运动方程式可表示为转动部分的惯性矩 J 与其角速度变化率 ϵ 之积等于合力矩 M_{tg} 。

$$J\epsilon = M_{tg}$$

式中 J ——机组的惯性力矩；

ϵ ——机组的角速度变化率， $\epsilon = \frac{d\omega}{dt}$ ；

ω ——机组的角速度， $\omega = \pi n/30$ ；

n ——机组的转速；

M_{tg} ——机组的合力矩， $M_{tg} = M_t - M_g$ 。

所以水轮发电机组的运动方程式，便可写成

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1-7)$$

可见，图 1-5 中力矩 M_{tK} 与角速度 ω 之间的变化关系，完全可由式 (1-7) 来描述。现在分三种情况讨论。

(1) 发电机负荷和水轮机流量都不变时。当发电机负荷与水轮机流量均不变时，机组运动方程式 (1-7) 右边的动力矩 M_t 和阻力矩 M_g 大小相等、方向相反，即

$$\begin{aligned} M_t &= M_g \\ M_{tK} &= M_t - M_g = 0 \end{aligned}$$

而方程式右边，便有

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0$$

由于 J 是机组的惯性矩，不等于零，只有

$$\frac{d\omega}{dt} = 0$$

即角加速度为零。因为角速度 ω 保持常数不变，所以机组处在原平衡点的稳定状态下运行 (见图 1-5)。

(2) 发电机负荷不变而水轮机流量变化时。当导叶开度由 α_0 增大到 α_2 ，即水轮机流量增加，动力矩由 M_t 增大到 M_{t2} ，使方程式 (1-7) 右边 $M_{t2} > M_g$ ， $M_{t2} - M_g = +\Delta M_t$ ，产生了多余的动力矩 $+\Delta M_t$ ；由于发电机负荷不变，而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt > 0$ ，产生角加速度，机组转速由 ω_0 升高到 ω_2 ，负荷力矩也随之增加，即 $M_g + \Delta M_g = M_{g2} = M_{t2}$ ，机组运行平衡点 O 向右上方移到 O_{α_2} 点，所对应的力矩为 M_{tK2} ，如图 1-6 所示。

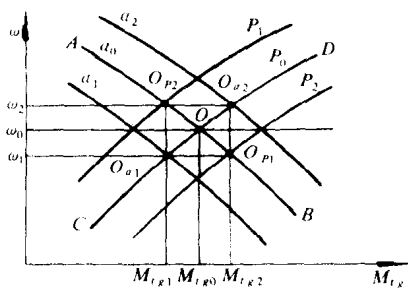


图 1-6 机组的 ω 与 M_{tK} 关系曲线

若导叶开度由 α_0 减小到 α_1 ，即水轮机流量减小，动力矩由 M_t 减小到 M_{t1} ，使方程式 (1-7) 右边 $M_{t1} < M_g$ ， $M_{t1} - M_g = -\Delta M_t$ ，产生了不足的动力矩 $-\Delta M_t$ ；由于发电机负荷不变，而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt < 0$ ，产生角减速度，机组转速由 ω_0 下降到 ω_1 ，负荷力矩也随之减小， $M_g - \Delta M_g = M_{g1} = M_{t1}$ ，机组运行平衡点 O 向左下方移动到 O_{α_1} ，所对应的力矩为 M_{tK1} ，如图 1-6 所示。

(3) 发电机负荷变化而水轮机流量不变时。当用户负荷由 P_0 增大到 P_2 ，负荷力矩由 M_g 增大到 M_{g2} 时，方程式 (1-7) 右边 $M_t < M_{g2}$ ， $M_t - M_{g2} = -\Delta M_t$ ，产生不足的动力矩 $-\Delta M_t$ ；由于导叶开度不变，而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt < 0$ ，产生角减速度，机组转速由 ω_0 下降到 ω_1 ，动力矩就相应的增大，即 $M_t + \Delta M_t = M_{t2} = M_{g2}$ ，机组运行平衡点 O 向右下方移动到 O_{P_1} ，所对应的力矩为 M_{tK2} ，如图 1-6 所示。

若用户负荷由 P_0 减小到 P_1 ，负荷力矩由 M_g 减小到 M_{g1} ，使方程式 (1-7) 右边 $M_t > M_{g1}$ ， $M_t - M_{g1} = +\Delta M_t$ ，产生多余的动力矩 $+\Delta M_t$ ；由于导叶开度不变，而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt > 0$ ，产生角加速度，机组转速由 ω_0 上升到 ω_2 ，动力矩就相应的减小，即

$M_t - \Delta M_t = M_{t1} = M_{r1}$, 机组运行平衡点 O 向左上方移动到 O_{P2} , 所对应的力矩为 M_{tR1} , 如图 1-6 所示。

上述情况表明, 在水轮机流量或发电机负荷单独变化时, 均使转速与力矩相互转化, 其结果是力矩重新平衡而转速发生了变化, 机组运行平衡点沿力矩曲线或负荷曲线移到新的平衡位置上稳定。

在实际运行中, 常常是导叶开度 (流量) 随负荷变化而变化。下面仍对上述分析的基础与方法, 作进一步讨论。

四、机组的无差和有差力矩特性

机组在运行中, 导叶开度经常随着负荷变化而变化。其跟随的程度, 即二者变化规律, 因机组运行方式即任务不同分为两种情形: 其一, 是使动力矩 M_t 变化量等于阻力矩 M_r 变化量, 确保调节前、后的转速偏差为零, 称无差调节特性, 以实现水轮机调节的基本任务。其二, 是使动力矩 M_t 变化量小于阻力矩 M_r 变化量, 确保调节前、后的转速偏差为一定值, 称有差调节特性, 以实现并列机组间的负荷合理分配。

1. 无差力矩特性的形成

(1) 调节前。机组处于稳定平衡状态, $M_t - M_r = 0$, $d\omega/dt = 0$, 运行平衡点为 O , 对应的力矩为 M_{tR0} , 角速度为 ω_0 , 如图 1-7。

(2) 调节过程。当负荷减小即从 P_0 减小到 P_1 时, 阻力矩也从 M_r 减到 M_{r1} , 使 $M_t > M_{r1}$, 于是运动方程式 (1-7) 右边 $M_t - M_{r1} = +\Delta M_t$, 产生多余的动力矩 $+\Delta M_t$, 而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt > 0$, 产生角加速度, 机组转速升高。与此同时, 相应地将导叶开度从 α_0 减到 α_1 , 将多余的动力矩 $+\Delta M_t$ 全被减掉, 便使 $M_t - \Delta M_t = M_{t1} = M_{r1}$ 、 $M_{tR1} = M_{t1} - M_{r1}$, 于是 $d\omega/dt < 0$, 又产生角减速度, 机组转速由高降低并恢复到原转速, $d\omega/dt = 0$ 。机组运行平衡点由 O 点向左水平移动到 O_1 点, 所对应的力矩为 M_{tR1} , 角速度为 ω_0 , 机组转速未变。

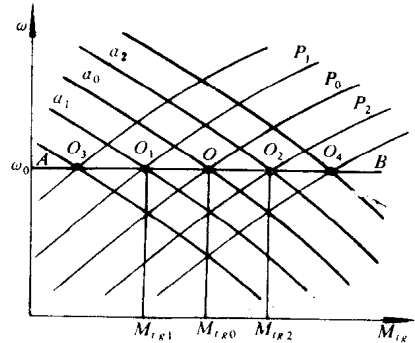


图 1-7 机组无差力矩特性

如负荷从 P_0 增大到 P_2 , 阻力矩也从 M_r 增到 M_{r2} , 使 $M_t < M_{r2}$, 于是运动方程式 (1-7) 右边 $M_t - M_{r2} = -\Delta M_t$, 产生不足的动力矩 $-\Delta M_t$, 而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt < 0$, 产生角减速度, 机组转速降低。与此同时, 相应地增大导叶开度从 α_0 增到 α_2 , 将不足的动力矩 $-\Delta M_t$ 全被补充, 便使 $M_t + \Delta M_t = M_{t2} = M_{r2}$ 、 $M_{tR2} = M_{t2} - M_{r2}$, 于是 $d\omega/dt > 0$, 又产生角加速度, 机组转速由低升高并恢复到原转速, $d\omega/dt = 0$ 。机组运行平衡点由 O 点向右水平移动到 O_2 点, 所对应的力矩为 M_{tR2} , 角速度为 ω_0 , 机组转速未变。

若负荷再次变化, 仍以相同的道理和过程类推。

(3) 调节后。结果表明, 调节前、后的转速差为零, 机组运行平衡点沿一条斜率为零的水平线移动, 如图 1-7 的 AB 线, 称为无差调节特性曲线。

2. 有差力矩特性的形成

(1) 调节前。机组处于稳定平衡状态, $M_t - M_r = 0$ 以及 $d\omega/dt = 0$, 运行平衡点为 O 点,

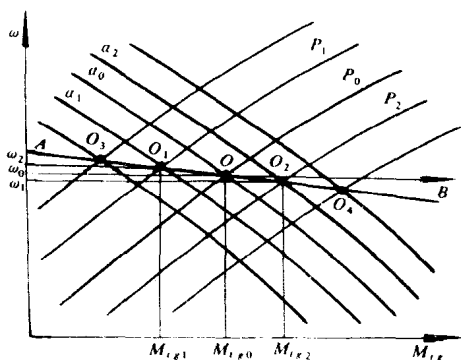


图 1-8 机组有差力矩特性曲线

对应的力矩为 $M_{t,r0}$ 、角速度为 ω_0 ，如图 1-8。

(2) 调节过程。当负荷从 P_0 减小到 P_1 ，阻力矩也从 M_g 减到 M_{g1} ，使 $M_t > M_{g1}$ ，于是运动方程式 (1-7) 右边 $M_t - M_{g1} = +\Delta M_t$ ，产生多余的动力矩 $+\Delta M_t$ ，而使方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt > 0$ ，产生角加速度，机组转速升高。与此同时，稍微的减小导叶开度即从 α_0 减到 α_1 ，将多余的动力矩 $+\Delta M_t$ 的绝大部分 $\Delta M'_t$ 被减掉，并产生角减速度，使得 $d\omega/dt < 0$ ，机组转速由高降低。但由于 $\Delta M_t - \Delta M'_t = \Delta M''_t$ ，还有尚未减掉的多余的动力矩 $\Delta M''_t$ 变成了升高的机组转速，使 $M_t - \Delta M'_t - \Delta M''_t = M_{t1} = M_{g1}$ 、 $M_{t,r1} = M_{t1} - M_{g1}$ ，故使机组角速度恢复到比原角速度 ω_0 稍高的新角速度 ω_2 上稳定， $d\omega/dt = 0$ 。机组运行平衡点由 O 向左上方移到 O_1 点，所对应的力矩为 $M_{t,r1}$ 、角速度为 ω_2 ，机组转速升高了。

若负荷从 P_0 增到 P_2 ，阻力矩也从 M_g 增到 M_{g2} ，使 $M_t < M_{g2}$ ，于是运动方程式 (1-7) 右边 $M_t - M_{g2} = -\Delta M_t$ ，产生不足的动力矩 $-\Delta M_t$ ，而使运动方程式 (1-7) 左边 $d\omega/dt < 0$ ，产生角减速度，机组转速降低。与此同时，稍微地增大导叶开度从 α_0 到 α_2 ，将不足的动力矩 $-\Delta M_t$ 的绝大部分 $\Delta M'_t$ 补充，并产生角加速度即 $d\omega/dt > 0$ ，机组转速由低升高。但由于 $-\Delta M_t + \Delta M'_t = -\Delta M''_t$ ，还有尚未补充的不足的动力矩 $-\Delta M''_t$ 变成了降低的机组转速，使 $M_t + \Delta M'_t + \Delta M''_t = M_{t2} = M_{g2}$ 、 $M_{t,r2} = M_{t2} - M_{g2}$ ，故使机组角速度恢复到比原角速度 ω_0 稍低的新角速度 ω_1 上稳定， $d\omega/dt = 0$ ，机组运行平衡点由 O 向右下方移到 O_2 点，所对应的力矩为 $M_{t,r2}$ 、角速度为 ω_1 ，机组转速降低了。

若负荷再次变化，仍以相同道理和过程类推。

(3) 调节后。结果表明，调节前、后的转速偏差为一定值，机组运行平衡点沿一条斜率为负值的斜线移动，如图 1-8 的 AB 线，称为有差调节特性曲线。

在实际工作中，为了使用方便均采用直接参数表示机组和调速器的无差和有差特性。故将图 1-7 和图 1-8 中的竖轴角速度 ω 用转速 n 或频率 f 表示；横轴力矩 M 用功率 P 或行程 Y 表示，便得到调速器和机组的典型静态特性曲线，见图 1-9。

五、调节对象的惯性及其对调节的影响

调节对象的惯性主要有输水管道中水流运动质量产生的惯性和水轮发电机组转动部分

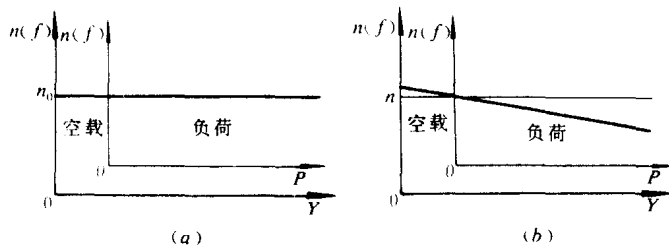


图 1-9 调速器和机组静态特性曲线

(a) 无差调节静特性曲线；(b) 有差调节静特性曲线

旋转质量产生的惯性以及发电机负载惯性等。在此仅对前两者进行讨论。

1. 水流惯性

机组在运行中，充满管道的水体不断地从管道中流过，当导叶开度快速变化或急剧关闭时，从水力学原理知道，水击压力计算式为

$$\Delta H = -\frac{L}{g} \times \frac{dV}{dt} = -\frac{L}{gF} \times \frac{dQ}{dt}$$

为了对惯性便于分析或计算，将上式用相对值无量纲形式表示。即设 ΔH 和 ΔQ 分别为动态过程中水轮机的水头和流量的增量；用 H_r 和 Q_r 分别代表水轮机的额定水头和流量，并为增量 ΔH 和 ΔQ 的基准值，其相对值为

$$\Delta H/H_r = h \quad \Delta Q/Q_r = q \quad dQ = d(Q_r + \Delta Q) = Q_r dq$$

于是得到

$$h = -\frac{LQ_r}{gFH_r} \times \frac{dq}{dt}$$

式中， LQ_r/gFH_r 为常数，是产生水流惯性的基本因素，其单位为秒，称为水流惯性时间常数。即在额定水头作用下，阀门突然全开时，充满管道的水体流量（或速度）由零增加到额定流量（或流速）所经历的时间，并用 T_w 表示如下

$$T_w = \frac{Q_r}{gH_r} \times \frac{L}{F}$$

由于过水系统全长管道截面通常是不等的，所以上式一般表示为

$$T_w = \frac{Q_r}{gH_r} \sum \frac{L_i}{F_i} \quad (1-8)$$

式中 Q_r ——水轮机额定流量， m^3/s ；

H_r ——水轮机额定水头， m ；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

L_i ——第 i 段管道的长度， m ；

F_i ——第 i 段管道的截面面积， m^2 。

T_w 值的大小反映了水流惯性的大小，该值越大表示水流惯性越大，水击作用越显著，从而导致机组转速变化落后于接力器运动速度，恶化调节过程，不利于调节作用。

2. 机组惯性

由于水轮发电机组机构笨重，旋转质量较大，故在运动方程式 (1-7) $Jd\omega/dt = M_t - M_g$ 中的惯性矩 J 值是比较大的。为了便于对惯性的理论分析与计算，将式 (1-7) 用相对值无量纲形式表示。即设 ΔM_t 和 ΔM_g 分别为动态过程中机组的动力矩和阻力矩的增量，并以 M_{t0} 和 M_{g0} 分别表示稳态时机组动力矩和阻力矩，且有 $M_{t0} = M_{g0}$ ，则得

$$M_t = M_{t0} + \Delta M_t \quad M_g = M_{g0} + \Delta M_g$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_t - \Delta M_g$$

当以机组额定力矩 M_r 和额定转速 ω_r 分别为增量 ΔM 和 $\Delta \omega$ 的基准值时，其相对值为