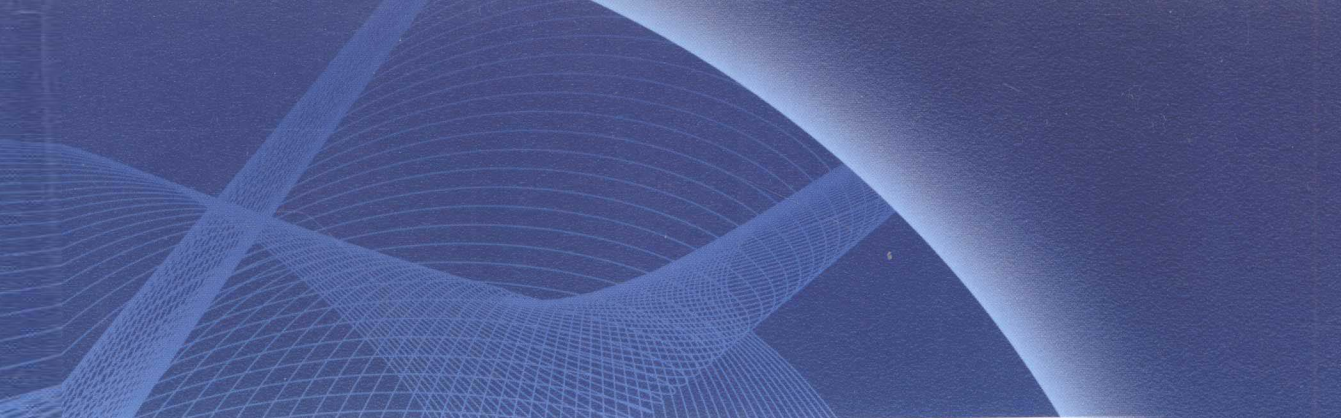




周泰经 吴应文 等 编著

叶鲁卿 主审

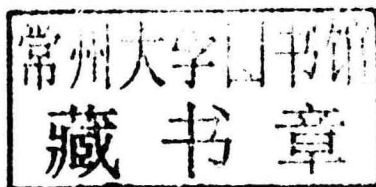
水轮机调速器实用技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

周泰经 吴应文 等 编著
叶鲁卿 主审

水轮机调速器实用技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从实际应用的角度出发,较全面地介绍了我国当代水轮机调速器在设计、制造和运行领域的新特点、新理念、新结构、新技术、新工艺,包括调保计算知识、传递函数知识以及调速器招评标和技术改造等内容。书中载有 30 多种新旧款式典型调速器图谱。

本书可供从事水轮机调速器的检修、运行、安装与测试人员及设计、科研、教学和制造业同行参考。

图书在版编目(CIP)数据

水轮机调速器实用技术 / 周泰经, 吴应文等编著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5084-7819-7

I. ①水… II. ①周… ②吴… III. ①水轮机—调速器 IV. ①TK730.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第169751号

书 名	水轮机调速器实用技术
作 者	周泰经 吴应文 等 编著 叶鲁卿 主审
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 17.25 印张 409 千字
版 次	2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	49.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国水力发电事业日新月异的发展，给水轮机调速器行业带来了勃勃生机。近 30 年来，水轮机调速器行业无论在基础理论研究和新产品开发领域，在结构设计与技术制造领域，在技术传授与教育领域，还是在运行维修与技术改造领域，都取得了十分喜人的成果。因此，编写一本普及读物，对推广应用这些成果，更好地为水电机组安全经济生产服务，为提高电能质量与调节品质服务，应当说是善事之举。

本书编著者周泰经先生和吴应文先生，是水轮机调速器领域的翘楚，是资深的工程师与专家。他们都有四五十年从业经历，有多项专利成果，颇多的学术论著，多项匠心独运的实用技术，尤其难能可贵的是，老骥伏枥，现今仍致力于调速器技术新高度的攀登。在编写过程中，长春工程学院王义林先生执笔第一章和第二章，湖南省水利厅黄长征先生执笔调节保证计算、招评标业务及收集众多调速器厂家资料等，长沙星特自控设备实验有限公司的青年工程师吕平、杨翠花参与了部分工作。

对于初涉水轮机调速器专业的青年朋友，从学习机械调速器基础知识入手，可能会收到事半功倍的效果。机械调速器立体直观，容易理解，便于掌握。现今品牌众多的微机调速器的控制原理，无不是从机械调速器的控制原理中孵化与演进的。现在仍在使用的机械调速器，既需要培养高水平的掌机手，也需要着手策划老机型的改造方案。因此，本书适当展开机械调速器的内容是必要的。

具有 PID 或 PI 调节规律的各种微机调速器，尽管它们在结构和功能上，以及在设计理念和应用传递函数上存有差异，但液压随动系统却大致相同，可谓异曲同工、殊途同归。学习微机调速器，主要是掌握驾驭它的要领，提高应用水平及判断处置各种故障的能力。

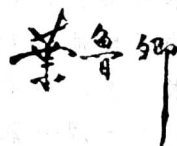
书中共收集 30 多款新旧调速器图谱，这对于已经熟悉一种机型，正在拓展掌握其他机型的同行，应当是有用的。学习、操作、维修相应机型设备时，对照相应的图谱，结合厂家提供的产品技术说明书，通晓设备技术细节会更得心应手。

作者在拟定本书编写提纲时，本想就调速器故障应对作些适当的铺陈，

但设备故障总是因机型而异，属于个性的东西多，属于共性的东西少，尤其是微机调速器，“冗余部件”的设置、故障自诊断能力的加强、“智能化”程度的不断提高、制造工艺的提高与精细，使现场处理故障的措施“傻瓜”化，空泛的谈论预防对策似乎作用不大。各种机型故障及预案处理方法，一般在机型的产品说明书内都有些说明。关于微机调速器的故障，见诸于科技文献者微乎其微，披露于现场测试报告者语焉不详，本书选列微机调速器目前常见的几种故障及其处理对策，虽为作者经验之谈，但颇具代表性，对于改善微机调速器设计制造应当很有帮助。

关于水轮发电机组过渡过程的调节保证计算问题，当然是设计人员的工作。本书选列的调保计算内容是站在工程复核的角度，对调保计算原理及重要性予以强调，这将有助于掌握优化水电机组的过渡过程品质。

最后，祝贺这本书的出版，希望本书成为同行们的良师益友。



2010年3月20日

目 录

序

第一章 水轮机调节概述	1
第一节 水轮机调节的任务及基本原理	1
第二节 水轮机调节系统的构成	9
第三节 调速器的分类	14
第四节 机械液压调速器应用概况	18
第五节 电气液压调速器应用概况	22
第六节 微机调速器应用概况	24
第二章 机械液压调速器	35
第一节 机械液压调速系统	35
第二节 飞摆和引导阀	39
第三节 辅助接力器和主配压阀	46
第四节 液压放大系统和杠杆反馈系统	54
第五节 主接力器	62
第六节 缓冲器	71
第三章 微机调速器	78
第一节 电液调速器的结构和功能	78
第二节 电液调速器的调节规律和调节参数	81
第三节 水轮发电机组转速测量	87
第四节 电子调节器和放大器	90
第五节 微机调速器的电路	94
第六节 微机调速器的人机交互界面	98
第七节 微机调速器的工作电源	100
第八节 电液随动系统	101
第九节 电/机和电/液转换部件	106
第十节 位移传感器	113
第四章 水轮发电机组调节保证计算	116
第一节 调节保证计算的任务和标准	116
第二节 水锤的一般概念	117

第三节	水电站过水系统的水压计算	126
第四节	计算机组甩负荷转速上升的基本公式	133
第五节	甩负荷试验	137
第六节	调保计算案例	140
第七节	调节保证计算超限对策和改善大波动过渡过程措施	151
第五章	若干典型调速器的图谱	156
第一节	新款调速器	156
第二节	各款旧式调速器	197
第三节	调速系统配套设备	217
第四节	关于调速器招评标的技术与商务	235
第六章	微机调速器故障处理调整试验	242
第一节	常见故障处理	242
第二节	调速器在水电站的调整试验	245
第三节	中小型机械液压调速器的技术改造	252
附录 A	水轮机电液调节系统及装置术语	257
附录 B	水轮机电液调节装置结构图	259
附录 C	油压装置压力容器的容量	265
附录 D	国内部分水利水电设备知名企业及产品介绍	266
参考文献		269

第一章 水轮机调节概述

第一节 水轮机调节的任务及基本原理

一、水轮机调节的任务

水轮发电机组在电力系统中占有相当比重。水轮发电机组利用可再生、无污染水能，发电成本低；水轮发电机组起动快，增减负荷迅速，改变工况方便，适于承担各种类型的系统负荷和担任系统事故备用容量。水轮发电机组在运转过程中，压力水流推动水轮机旋转将水能转换成机械能，水轮机带动发电机旋转将机械能转换成交流电能。交流电能经变压器升压后送至电力用户或电力系统。水电厂电能生产过程和能量转换控制过程如图 1-1、图 1-2 所示。安全、优质、经济地完成水能到电能的转换，并将足够的优质电能供给电力系统，是对水电厂水轮发电机组的基本要求。电力用户的负荷随时都在变化，电力系统负荷在很大范围内不断波动。电力系统必须满足用户对电能总的数量需求，以保持电力系统有功功率平衡；电力系统还必须保证交流电能的频率和电压稳定，将频率和电压值维持在标准规定允许偏差的范围内。我国供用电标准规定，交流电的额定频率为 50Hz，容量在 3000MW 以上的大容量电网允许频率偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；容量在 3000MW 以下的小电网允许频率偏差为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。电力系统要求各种发电机组，都必须具有优良的调节性能，能根据负荷的变化，随时相应改变各自的有功功率输出，并保证电能质量（频率 f 、电压 U ）符合标准规定。

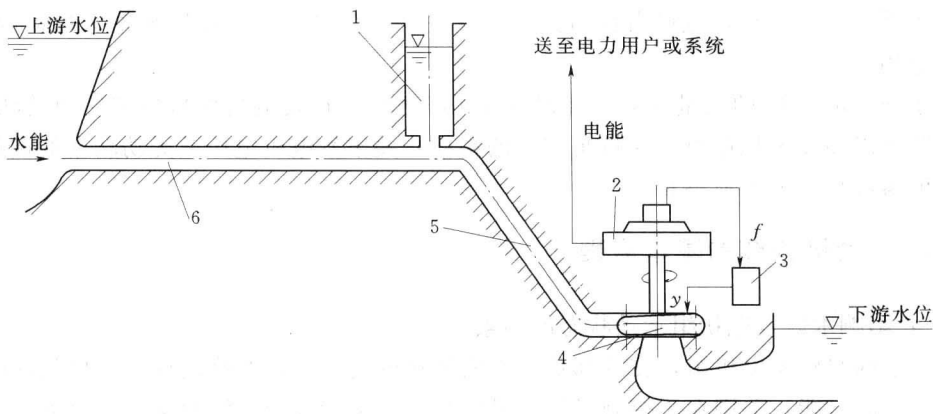


图 1-1 水电厂电能生产过程示意图

1—调压室；2—发电机；3—调速器；4—水轮机；5—压力管道；6—引水隧洞

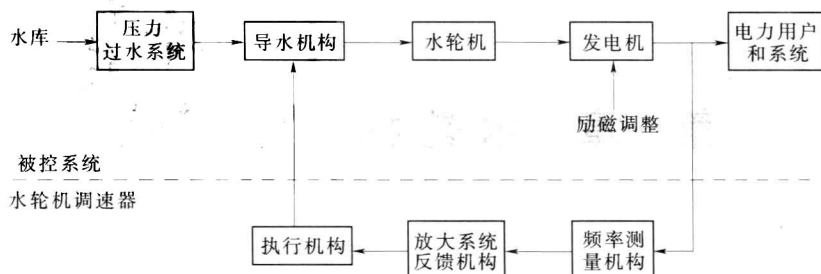


图 1-2 水电厂电能生产过程控制方框图

交流发电机所产生的交流电的频率与发电机的转速有如下关系

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

式中 f ——发电机输出的交流电流的频率, Hz;

n ——发电机的转速, r/min;

p ——发电机的磁极对数。

由式 (1-1) 频率与转速的正比关系可知, 运行中的水轮发电机组, 要保证其电流频率不超出允许偏差, 就必须保持机组转速在允许范围之内。发电机发出交流电的频率为额定值的转速, 是发电机的额定转速。发电机频率 f 和转速 n 的相对值相同, 变化一致。

保持发电机组在负荷不断变化的情况下, 总能维持额定转速, 发出符合额定频率的、足够的交流电能, 是对发电的原动机的基本要求。这必须通过原动机调节来实现。

水轮机调节的任务是, 根据负荷变化引起机组转速 (或频率) 的偏差, 随时调节水轮发电机组的有功功率输出, 及时恢复机组功率平衡, 维持发电机频率稳定在允许的范围之内。

水轮机调节工作, 就是对由水轮机、发电机、调节装置、压力引水系统、电力系统等环节组成的闭环系统, 由水能到电能的生产过程功率与频率的控制。在水轮机调节的闭环系统内, 水轮发电机组是被调节对象 (调节对象), 调速器是调节控制装置。调节工作可以用人工手动方式进行, 也可由自动调节装置完成。在水电厂, 各种水轮机自动调速器, 被广泛应用。

关于交流电压 U 的质量标准, 规程也有相应规定。在发电机保持额定转速的状态下, 励磁装置可以使发电机端电压保持足够高的精度。关于发电机电压及无功功率的调整控制系统, 可参考另外的专业书籍。

二、水轮机调节的基本原理

(一) 影响水轮发电机组运动状态的因素

运行中的水轮发电机组, 在外部负荷不断变化的情况下, 始终能保证输出足够的、频率稳定的交流电能, 关键在于控制机组能量的平衡并保持以额定转速旋转的运动状态。

水轮发电机组的转子围绕固定轴线作旋转运动, 其运动状态是由水轮机动力矩、发电机阻力矩以及机组自身的转动惯量等因素相互作用而确定的, 其运动原理如图 1-3 所示。

描述水轮发电机组运动的基本方程式为

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

式中 J ——机组转动部分的惯性矩又称转动

惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

ω ——机组转动角速度, rad/s ;

M_t ——水轮机的动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

M_g ——发电机的阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

机组转动部分的惯性矩(转动惯量) J 由转子的质量、形状、尺寸确定,它是与转子飞轮效应有关的、表征自身转动惯性对运动影响的参数。足够大的惯性矩,可以减小角加速度值,即减小角速度的变化率。

机组转动角速度 ω 是转子上某一点在单位时间(1s)内转过的以弧度(rad)为单位的平面角度值 ($\omega = \pi n / 30$)。角加速度 $d\omega/dt$ 是角速度 ω 对时间的变化率。

水轮机动力矩 M_t 是水轮机输出转矩,它由水轮机流量确定并受流态影响。动力矩推动水轮机按其作用方向转动,水轮机动力矩 M_t 可由水力机组的主要参数求取。

发电机阻力矩 M_g 是由发电机负载用电量及负载性质形成的电磁阻力矩(负载转矩),是阻力矩 M_g 的主要部分,另外也包括机械摩阻力矩。阻力矩是对机组旋转运动产生阻碍作用的转矩,其方向与机组转动方向相反。

根据水轮机原理,可求出水轮机输出的机械功率 N_t 值,并用 N_t 值求出水轮机动力矩 M_t 值

$$N_t = \rho Q H \eta_t = M_t \omega \quad (1-3)$$

$$M_t = \frac{\rho Q H \eta_t}{\omega} \quad (1-4)$$

式中 M_t ——水轮机动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

N_t ——水轮机的出力, kW ;

Q ——水轮机的流量, m^3/s ;

H ——水轮机的工作水头, m ;

η_t ——水轮机的效率;

ρ ——水的密度, kg/m^3 ;

ω ——水轮机转动角速度, rad/s 。

水的密度 ρ 即单位水体的质量,基本上为常数,角速度 ω 是力图保持不变的参数,能够改变的只有效率 η_t 、水头 H 和流量 Q 三个参数。

水轮机效率 η_t 是用相对值表示的水轮机对能量有效利用程度的参数,水轮机应具有较高效率值,单纯靠改变效率进行水轮机调节是不可取的。

水轮机工作水头(或净水头) H 即水轮机进、出口断面的比能差数值。水头值虽然

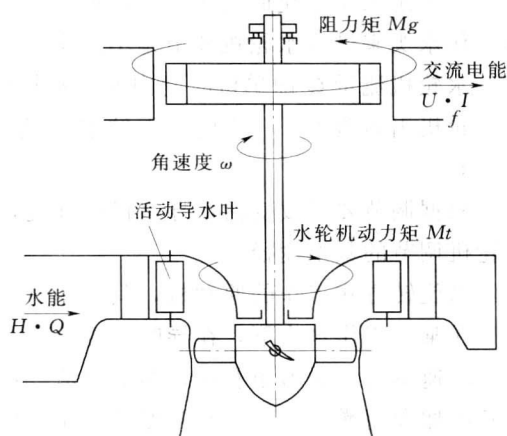


图 1-3 水轮发电机组运动示意图

会因上下游水位变化而有所变化,但在一个时段内其改变量很小,亦可视其为常数。靠改变工作水头来进行水轮机调节是不现实的。

水轮机流量 Q 即单位时间内通过水轮机的水量。 Q 值愈大, QH 乘积愈大,单位时间内水轮机出力愈大,一定转速下的水轮机动力矩愈大。水轮机流量 Q 受活动导水机构开度控制。

根据调节要求改变活动导水机构开度,改变水轮机的流量 Q ,保持机组能量平衡,是水轮机调节的基本途径。

以旋转方式工作的原动机,其功率 N 和力矩 M 间有确定的对应关系: $N/\omega=M$ 。

在某一工作水头下,在导叶开度不变时,动力矩随转速升高而减小,随转速降低而增大,转速不变,动力矩有确定的对应值。在保持相同转速的条件下,水轮机动力矩会随导叶开度加大而增大,随导叶开度减小而减少。

发电机负荷阻力矩 M_g 的大小,主要取决于发电机单位时间内供给外部负载的电能量及负载的性质。发电机输出电功率常简称为负荷,电力用户对电能需求在不断变化,使得发电机负荷不断变化,发电机的负荷阻力矩也会不断改变。电力用户(或电力系统)电能需求的变化,造成发电机负荷阻力矩变化,是引起机组运动状态改变的外部原因。

发电机阻力矩中还包含转子转动需要克服的机械摩擦与空气阻力等形成的摩阻力矩 M_n 。 M_n 是机组达到空载额定转速需要克服的阻力矩,它比发电机最大负荷阻力矩小得多(从机组空载、满载开度值的差别大致可以间接看出), M_n 在额定转速附近基本保持不变。故在机组带负荷运行的力矩平衡关系中,无需单独考虑其影响,但在空载运行工况, M_n 是机组阻力矩的主要部分,在甩负荷过程中, M_n 是机组升速的主要阻碍作用。

当水轮机的出力与发电机的负荷相等,机组动力矩与阻力矩平衡 ($M_t=M_g$),机组能保持以额定转速稳定运行状态。稳定运行的机组,角加速度为零,角速度 ω 为常数,转速 n 保持不变。

若发电机的负荷减少,水轮机的出力不能随之相应减小时, $M_t>M_g$, 角加速度值为正值,机组角速度 ω (转速 n) 升高。若发电机负荷增大,水轮机出力未变,则 $M_t<M_g$, 角加速度为负值,机组角速度 ω (转速 n) 降低。

带负荷运行的水轮发电机组,受外部负荷变化的扰动,机组运动状态发生改变,如不及时进行调节,就无法维持频率稳定及保证用户对电能的需求。

(二) 水轮发电机组力矩特性、静态特性、动态特性

1. 水轮机动力矩特性

水轮机的动力矩 M_t 是导叶开度 a 、水头 H 、转速 n 和效率 η 的函数。水轮机的力矩特性,是指在导叶开度一定和水头不变的情况下,水轮机的转速 n 与动力矩 M_t 之间的对应关系。图 1-4 中的曲线 AB ,是导叶开度为 a 时,水轮机动力矩与转速变化的关系曲线,它具有负的斜率。当水轮机开度(出力)改变时, $M_t=f(n)$ 的对应关系也随之改变:开度减小到 a_1 时,水轮机力矩特性曲线为 A_1B_1 ;开度增大到 a_2 时,力矩特性曲线

为 A_2B_2 。在一定水头下，导叶开度为一系列定值，得出一组水轮机动力矩特性曲线，该曲线符合依据水轮机模型试验结果换算到原型机的力矩与转速对应关系，也为原型机现场试验所证实。

在开度为 a 的动力矩特性曲线 AB 上，当运行平衡点为 O 时，转速为 n_0 、动力矩为 M_{r0} ，水轮机动力矩与外部阻力矩相平衡；当外部阻力矩减小，转速由 n_0 升高为 n_1 时，水轮机动力矩由 M_{r0} 减小到 M_{r1} ，运行平衡点由 O 移到 O_1 ，随着转速升高，水轮机动力矩会逐渐减小，具有抑制转速升高的作用；反之，当外部阻力矩增大，转速由 n_0 降低为 n_2 时，水轮机动力矩由 M_{r0} 增大到 M_{r2} ，运行平衡点由 O 移到 O_2 ，随着转速降低，水轮机动力矩会逐渐增大，具有抑制转速降低的作用。以上变化过程表明，水轮机本身具有一种自平衡或自调节效应，这种效应对水轮机调节是有帮助的，它是由于转速变化影响水轮机的过流状态而产生的。

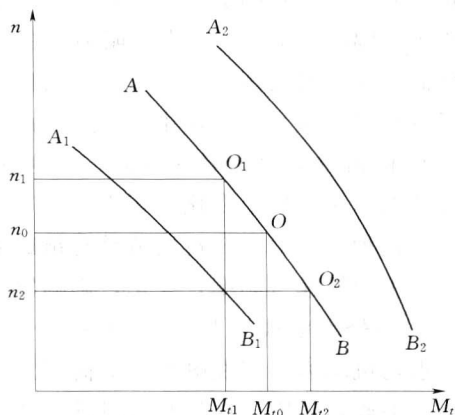


图 1-4 水轮机力矩特性

2. 发电机负荷阻力矩特性

发电机的负荷阻力矩 M_g 的大小，取决于发电机供给负载有功功率的数量，即负载的功率值。但是，在一定的负荷下，发电机的负荷阻力矩还会因转速（频率）不同而有所变化，因为频率变化会直接影响发电机负载实际消耗的功率。根据负载性质的不同，有的负荷与频率成正比关系，有的负荷与频率成二次方或高次方关系，也有的负荷不随频率变化。

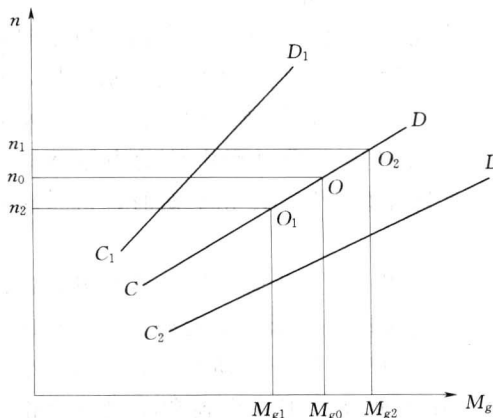


图 1-5 发电力矩特性

系统中众多电力用户（多为电感性或电阻性负载）综合后的负载的阻力矩特性，是随转速（频率）增加而增加的。当发电机负荷不变时，装有电压校正器的发电机其负荷阻力矩与转速的对应关系取决于负载的性质。当用电设备为某一种组合，发电机负荷不变时，发电机负荷阻力矩与转速的对应关系，可用发电机负荷阻力矩特性表述。

发电机负荷阻力矩特性，指当发电机外部负荷（用电设备组合）不变时，发电机的转速 n 与负荷阻力矩 M_g 的对应关系，即 $M_g = f(n)$ ，如图 1-5 所示。在某一负荷 p 下，发电机阻力矩特性用坐标图中曲线 CD 表示，

CD 具有正的斜率。当用电设备组合及用电负荷改变时， $M_g = f(n)$ 的对应关系由另外的曲线表示，负荷减小时为曲线 C_1D_1 ，负荷增大时为曲线 C_2D_2 。

在负荷为 p 的阻力矩特性曲线 CD 上，若发电机运行平衡点为 O （与水轮机动力矩的

平衡点), 发电机转速为 n_0 , 发电机负荷阻力矩为 M_{g0} 。当水轮机动力矩增大, 发电机转速由 n_0 升高为 n_1 时, 发电机阻力矩由 M_{g0} 增大到 M_{g2} , 运行平衡点由 O 移到 O_2 , 随着转速升高, 发电机的阻力矩会沿 CD 线自行增大, 会起到抑制转速升高的作用; 反之, 当水轮机的动力矩减小, 转速由 n_0 降低为 n_2 时, 发电机阻力矩由 M_{g0} 减少到 M_{g1} , 运行平衡点由 O 移到 O_1 , 随着转速降低, 发电机的负荷阻力矩会沿 CD 线自行减小, 具有抑制转速降低的作用。以上变化过程表明, 在一般情况下, 发电机本身具有一种自平衡或自调节效应, 这种效应对水轮机调节是有帮助的。发电机这种阻力矩随转速变化而自行改变的效应, 是由于转速 (频率) 变化, 影响发电机外部负载的实际消耗功率发生改变而引起的。

3. 水轮发电机组力矩平衡特性

水轮机动力矩和发电机的负荷阻力矩的力矩特性, 有相反的变化趋势, 且都具有自调节 (自平衡) 效应, 这是对机组进行调节的基础。水轮机调节就是靠改变机组力矩平衡关系来实现的。

(1) 无调节机组的力矩平衡特性。导叶开度固定的无调节机组, 水轮机力矩特性线为不变的 AB 曲线, 在负荷变化的情况下, 它与不同的发电机负荷阻力矩特性线有一系列交点, 对应一系列稳定转速, 但各稳定转速有很大差异 (图 1-6), 即其初始力矩的原平衡点, 与负荷变化后靠水轮机自调节作用得到的后继新平衡点, 转速有很大差别。这说明无调节机组, 单纯靠自平衡作用, 以转速变化取得动力矩自行变化量, 达到与变化的阻力矩相平衡, 不能满足机组转速稳定的基本要求。

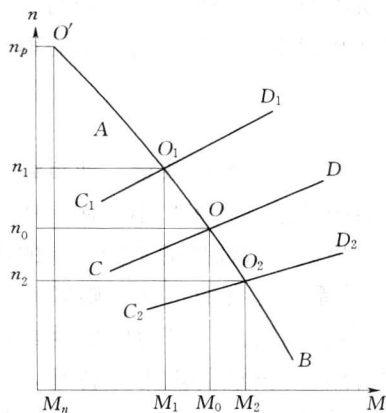


图 1-6 无调节水轮发电机组的力矩平衡特性

无调节水轮发电机组, 各种负荷下力矩平衡的稳定工况点, 都位于不变化的水轮机动力矩特性线 AB 上, 曲线 AB 就是无调节机组的静态特性曲线。

假如无调节水轮发电机组, 突发甩负荷, 发电机负荷阻力矩突然消失, 没有可以快速关闭的导水机构, 水轮机仍保持相当大的动力矩, 转速必然快速上升。水轮机的自调节作用会在转速上升过程中使动力矩逐渐减小, 到其与机组实际摩阻力矩 M_n 相平衡时, 机组转速

上升才会停止, 稳定在相当高的转速上。

假定在极端情况下, 满载运行的水轮发电机组突然甩 100% 负荷, 调速器失灵, 过速保护又未动作, 导水机构停在最大开度不能关闭, 机组转动部分承受最大动力矩, 转速快速上升, 虽有足够大的转动惯量使机组升速不致太快, 但阻碍转子转动的仅有相对较小的机械摩阻力矩, 只有当水轮机转速升高到其自调节作用使动力矩减小到和摩阻力矩相当时, 机组转速才会停止上升。这时机组的转速可能会接近飞逸转速 n_p 。为保证安全, 即或发生这样严重事故时, 也绝不允许机组转速达到飞逸转速值。在发生大波动工况时, 导叶紧急关闭会使过水压力系统发生最大水击压力上升, 也必须在安全允许范围之内。机组设备设计、制造与选择, 以及水电厂设计施工, 都严格按调节保证计算要求进行, 可以使机组与引排水系统能承受这样严格的考验。机组完善的多重保护装置, 能够防止这种极端

情况的发生。飞逸转速 n_p 是由机组强度设计确定的临界转速值。不同型式的水轮发电机组，其飞逸转速和额定转速的比值约为 1.7~2.6 之间。

由前面对机组力矩特性分析可知，只有依据频差及时改变水轮机开度，调整水轮机流量，改变动力矩，使之与变化的负荷阻力矩相等，才能实现要求的力矩（功率）平衡，保持频率稳定。

(2) 有差调节机组的力矩平衡特性。如图 1-7 所示为按有差特性进行调节时的水轮发电机组的力矩平衡关系：工况点 O 为发电机阻力矩特性线 CD 和水轮机动力矩特性线 AB 的交点，此时发电机负荷与水轮机出力相当，机组以转速 n_0 稳定运行；当发电机负荷减小其力矩特性线移到 C_1D_1 位置，调速器自动关机调节，关小导叶开度减少流量，使水轮机动力矩特性线移至 A_1B_1 位置，交 C_1D_1 曲线于 O_1 点，机组以稍高的转速 n_1 稳定运行；当发电机负荷增大其力矩特性线移到 C_2D_2 位置，开大导叶开度增大流量，使水轮机动力矩特性线移至 A_2B_2 位置，与 C_2D_2 曲线交于 O_2 点，机组以稍低的转速 n_2 稳定运行。

关方向调节后，机组转速略有升高；开方向调节后，机组转速略有降低。通过一系列转速不相同的稳定工况点的曲线，就是水轮发电机组的有差静态特性曲线。机组的有差静特性，是自动调速器的永态转差机构的永态负反馈作用造成的。电力系统大多数发电机组都以有差静态特性运行。

(3) 无差调节机组的力矩平衡特性。若将自动调速器永态转差机构的永态负反馈作用调整为零，机组每次调节后，所有稳定工况点对应的转速值都相同（图 1-8），通过一系列转速相同的稳定工况点的曲线，就是机组的无差静态特性线。

4. 水轮发电机组的静态特性

水轮发电机组的静态特性曲线，一般用被控参量频率（或转速）与输出功率的对应变化，即功率与转速的对应关系曲线 $n=f(N)$ 表示，或用功率与频率的对应关系曲线 $f=F(N)$ 表示（图 1-9）。

机组静特性曲线的斜率必须能在要求的较小负值和零之间调整。机组静特性曲线的斜率即是机组的调差率 e_p 。水轮发电机组的调差率应能在 0~10% 的范围内调整，以满足机组以有差或无差特性并网运行的要求。为保证负荷分配的准确性，机组静特性曲线的非线性度与死区必须很小。

调速器静特性曲线是主接力器开度 Y 与测速元件转速（或频率）间的对应关系曲线，

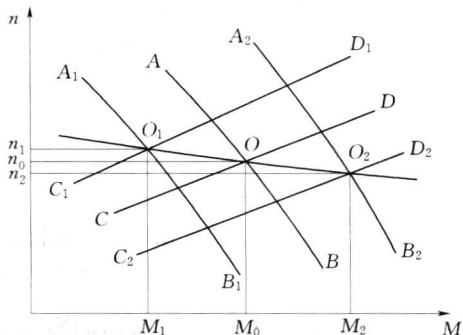


图 1-7 按有差静态特性进行调节的水轮发电机组的力矩平衡关系

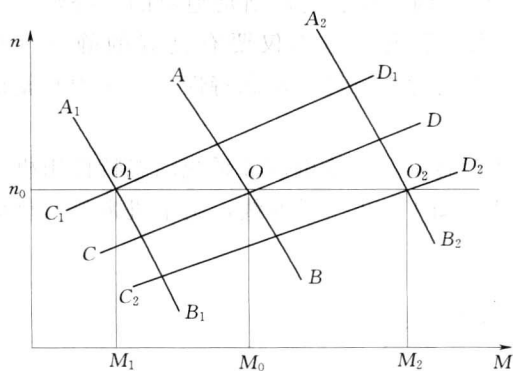


图 1-8 按无差静态特性进行调节的水轮发电机组的力矩平衡关系

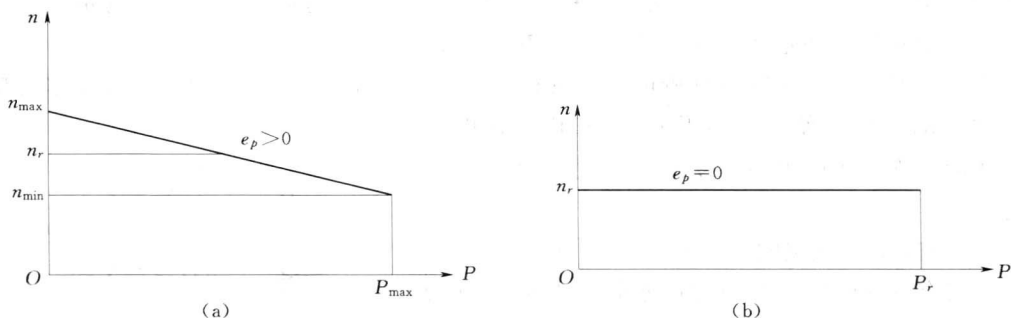


图 1-9 水轮发电机组调节系统静态特性曲线

(a) 有差静态特性曲线；(b) 无差静态特性曲线

$n=f(Y)$ 或 $f=F(Y)$ 。调速器静特性曲线的斜率可在 $0\sim 10\%$ 的范围调整，调速器静特

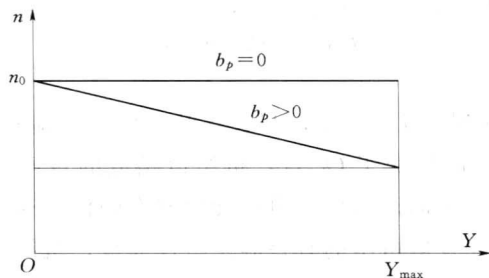


图 1-10 调速器静态特性曲线

性曲线的斜率称之为调速器永态转差系数 b_p 。调速器具有能在要求范围内调整的永态转差系数 b_p ，受其控制的机组才能具有要求的调差率 e_p ，以及可改变的有差或无差静态特性（图 1-10）。

5. 水轮发电机组的动态特性

水轮发电机组的稳定状态是相对的、短暂的，而其调节动态过程则是绝对的、经常发生的。水轮发电机组不仅要有良好的静态（稳

态）特性，还应有优良的动态特性。水轮发电机组的静态特性、动态特性，也称为水轮机调节系统的静态特性、动态特性。

机组动态特性体现了调节系统过渡过程的动态品质。水轮机调节系统动态特性用机组转速（频率）随时间的变化关系 $n=f(t)$ 来表述。图 1-11 所示曲线，是单机带孤立负荷运行的机组，外部负荷减少转速升高，自动关机调节过程，转速随时间变化的过程线。该曲线就是水轮机调节系统的动态特性线，曲线形态表明这是一个经 1.5 次衰减波动即转入新稳态（转速 n 稳定在允许偏差范围 2Δ 之内）的调节过渡过程。对示波曲线进行判读，确定出与过渡过程形态相关的指标，并与标准或规程允许值相比较，即可判定动态特性的品质是否优良。

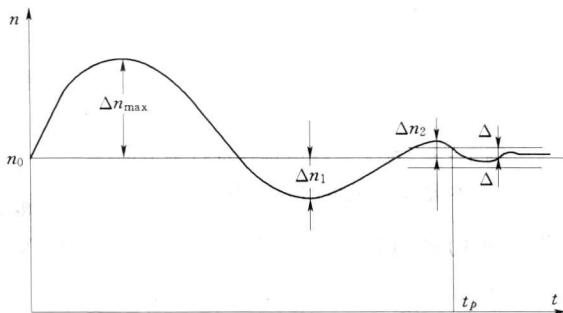


图 1-11 水轮发电机组调节系统动态特性曲线

对调节系统动态品质须检验的有下列各项技术指标：最大转速偏差 $\Delta n_{\max}$ ；超调量 δ ($\delta = \Delta n_1 / \Delta n_{\max} \times 100\%$)；波动次数 X （出现一个正波峰和一个负波峰计为一次）；调节时间 t_p 。技术标准规定的各项要求，给出了对过渡过程形态的判定标准，完全符合其要求的

过渡过程，必然是最大转速偏差 $\Delta n_{\max}$ 不大，超调量 δ 较小，波动次数 X 很少，调节时间 t_p 较短，动态品质优良的稳定性好的过渡过程。

带负荷运行机组，全面检验过渡过程品质各项指标受到一定限制。检验水轮机调节系统动态特性的方法常用空载扰动试验法，即由转速（或频率）给定装置发出阶跃扰动，造成空载自动运行机组转速波动并记录其过渡过程的波形，然后分析其各项动态品质指标是否合格。甩负荷试验，则是对水轮机调节系统过渡过程稳定性的最严格检验。

有的水轮机调节系统，过渡过程波形曲线可能偶尔呈现非周期衰减形态，曲线只有一个波峰即转入稳态，这是由于接下来的波动幅度很小，均在允许偏差范围之内的缘故。如果调节系统过渡过程波形曲线，呈现不息波动的形态，表明该系统不稳定。可能是系统参数调整不当或设备发生故障所致，应采取措施予以消除。根本无法实现稳定运行的系统，可能是系统本身的某个环节，在设计、制造、施工、安装上存在严重问题。

第二节 水轮机调节系统的构成

一、水轮机调节系统的构成

水轮机调速器是调节控制装置，水轮发电机组是被控制对象，它们构成闭环自动控制系统。调速器具有测量元件、放大元件、反馈元件、执行元件等基本环节，可称为调速系统。水轮发电机组将水能变为电能的过程，应包括为其输送水能的引、排水系统，及由其供电的电力用户或电网，由许多环节构成的被调节对象，也称为被控制系统（图 1-12）。

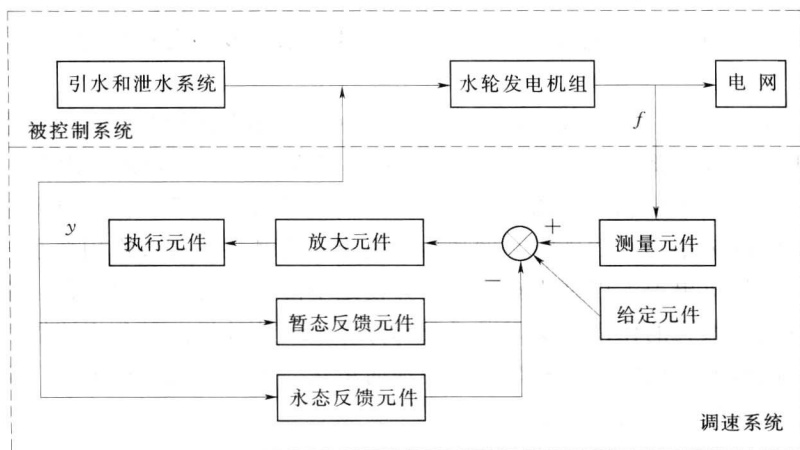


图 1-12 水轮机调节系统方框图

水轮机调节系统的工作状态一般可分为：稳态、小波动（小瞬变）工况、大波动（大瞬变）工况等。不论出现小波动或大波动工况，调速器都必须自动进行及时恰当的调节，使系统经最优动态过程转入新的稳态。

当负荷变化引起机组频率 f (转速 n) 改变时, 调速器的测量元件随时将频率 f (转速 n) 值与给定值相比较, 并根据被控参量的偏差方向与大小发出调节信号。放大元件对调节信号进行足够的功率放大, 并驱动水轮机流量控制机构向消除偏差的方向动作进行流量改变。反馈元件提供的负反馈作用对调节动态过程进行校正, 以保证系统有优良的动态特性及要求的静态特性。在水轮机流量 Q 改变到符合调节要求的量值, 机组有功功率输出改变到与变化的负荷达到新的平衡, 调节过程中止, 系统转入新的稳态, 水轮机调节系统重新恢复到被控参量——频率 (转速) 维持在允许范围之内, 输入输出能量平衡的稳定运行工况。

二、调节对象的特征参数

水轮机调节系统是一个涉及水、机、电能量转换的多参数复杂控制系统。调节对象——水轮发电机组具有自身特殊的物理属性, 它本身具有较大的水流、机械惯性; 其发电过程总是处于外部负荷不断变化的扰动之下, 要保持电流频率稳定, 又要随时满足电力系统正常及故障情况的有功功率需求; 所利用单位水体的能量指标 (工作水头) 受自然条件影响, 会缓慢发生较大改变; 调速系统本身具有的惯性与延迟等, 会对调节过程产生某些不利影响。这些决定了水轮机调节系统是一个复杂的非线性的动态系统, 也对水电生产过程的调节控制提装置出更高的要求。

1. 调节对象的水力特征参数

受河道天然条件限制, 集中河道落差的挡水、引水构筑物造成的毛水头通常只有十几米至百余米 (达数百米者较少), 水电站净水头要小于这个数值。利用这样低压力水能发电, 通常需要较大的流量。水轮机前的压力引水管道一般较长, 管道中的水体具有相当大的惯性。进行水轮机调节时, 常需使管道内流量 (流速) 在短时间内发生很大改变, 水流惯性必然造成水轮机前的水压值产生较大波动, 这种水压波动会对水轮机调节过程造成很大干扰。

引水管道水流惯性, 使得调节过程中快速关 (开) 导水机构时, 压力引水管道出现较大的水压力上升 (或下降)。由水流惯性产生的水锤现象, 伴随着每一次开、关导叶的调节动作而发生, 并且总是和流量调节作用相反, 使调节效果滞后, 甚至导致过度调节, 给系统的动态稳定性带来不利的影响。例如, 当系统转速升高, 调节作用关小导叶开度, 减小流量, 减少水轮机出力, 以制止转速上升并使之下降; 而关闭过程引起的水压升高, 反而有使水轮机出力增大的作用, 从而滞后及部分抵消调节效果。量化水流惯性对水轮机调节系统稳定性的影响, 能使这一复杂问题处理简单化。水轮机调节理论中, 将水流惯性影响的大小, 用水流惯性时间常数来表征。

压力引水管道水流惯性时间常数 T_w 的表达式为

$$T_w = \frac{\sum L_i V_i}{g H_r} \quad (1-5)$$

式中 T_w ——水流惯性时间常数, s;

H_r ——水轮机的设计水头, 即水轮机发出额定功率的最小水头, m;