

中等专业学校教材

水轮机调节及辅助设备

湖北省水利学校 张维强 主编

水利电力出版社

中等专业学校教材

水利部水利学校编写，水利部水利学校教材编审委员会审定

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水利部水利学校水利专业教材编审委员会审定，中、小型水利学校教材

水轮机调节及辅助设备

湖北省水利学校 张维强 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

水利电力出版社

内 容 提 要

全书共分两篇，第一篇为水轮机调节部分，重点讲述了水轮机调节的基本知识、中、小型机械液压型调速器和电气液压型调速器的工作原理、调整试验、运行方式及常见故障；第二篇为辅助设备部分，讲述了水电站油、气、水系统及主阀的系统图拟定、设备选择及运行维护。

本书可作为中等专业学校“水电站电气设备”专业教材，也可供中、小型水电站从事调速器及辅助设备安装、检修和运行的技术人员及有关技术人员参考。

中等专业学校教材

水轮机调节及辅助设备

河北省水利学校 张维强 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 22印张 501千字 1插页

1986年11月第一版 1986年11月北京第一次印刷

印数00001—15630册 定价3.20元

书号 15143·6162

前 言

本书是根据1982年在广州召开的“水电站电气设备”专业座谈会制定的《水轮机调节及辅助设备》教学大纲（报批稿）编写的。

全书主要包括：水轮机调节的基本原理；机械与电气液压型调速器的结构原理及运行；被控制系统的特性；调速器及调节系统的调整、试验和调速器的常见故障；水电站油、气、水系统及其他辅助设备的选择与运行维护。

根据教学大纲要求本书着重讲述了中、小型调速器及单机3000kW以下的小型水电站油、气、水系统及辅助设备的工作原理与运行维护，并吸收了国内近年来的科研、设计、安装和运行的一些实践经验。

全书共分为十章，贵州省水利电力学校梁宝山同志编写第二章；四川省水利电力学校林亚一同志编写第七、八章；湖北省水利学校秦达同志编写第九、十章；其他各章由湖北省水利学校张维强同志编写并由张维强同志担任主编。

本书由湖南省水利电力学校吕鸿年同志担任主审。

在本书编写过程中，李敬恒、李培深、刘炳文、金少士、曹炳奎、陈登等同志提供了许多宝贵意见和参考资料，在此表示衷心感谢。

由于我们学识水平和实践经验有限，书中不当之处敬请读者批评指正。

编 者

一九八五年八月

目 录

第一篇 水轮机调节

第一章 水轮机调节的基本原理	1
第一节 概述	1
第二节 水轮机调节的途径	4
第三节 调速器的构成与环节	9
第四节 调速器中的比例环节	16
第五节 调速器中的积分环节与液压随动系统	21
第六节 调速器中的微分环节与比例—积分调节器	27
第七节 各种调节规律的调速器	37
第八节 调速器的分类及其发展	51
第二章 机械液压型调速器	52
第一节 概述	52
第二节 油压装置	54
第三节 离心摆与引导阀	60
第四节 主配压阀与主接力器	69
第五节 硬反馈与控制机构	79
第六节 软反馈机构	91
第七节 小型调速器的整机动作原理及运行操作	101
第八节 小型调速器的整机调整与试动	107
第九节 中型机械液压型调速器	113
第十节 双重调节机械液压型调速器	120
第三章 调速器与调节系统的调整试验	123
第一节 调速器特性试验	123
第二节 被控制系统的特性及其对调节的影响	131
第三节 调节系统的静态特性	138
第四节 调节系统的动态特性	143
第五节 调节系统的特性试验	151
第六节 最佳运行参数的选择	159
第七节 机械液压型调速器常见故障的分析	161
第四章 电气液压型调速器	165
第一节 概述	165
第二节 测频回路	167
第三节 电液调速器的位移传感器与反馈回路	178
第四节 调节信号综合与放大回路	189

第五节	人工失灵回路	193
第六节	电液转换器	195
第七节	电气液压型调速器的整机动作原理	200
第八节	电气液压型调速器的调整试验与常见故障	207
第五章	调节保证计算与调速器选择	214
第一节	调节保证计算的意义和任务	214
第二节	水击压力计算	214
第三节	转速变化计算	224
第四节	调节保证计算的标准和计算步骤	227
第五节	减小水击压力与速率上升的措施	229
第六节	调速器选择	233

第二篇 辅助设备

第六章	油系统	237
第一节	油系统的任务与对油质的要求	237
第二节	油系统的设计	243
第三节	油系统的运行与维护	251
第七章	压缩空气系统	254
第一节	压缩空气的用途和压缩空气的产生	254
第二节	压缩空气系统的设计	260
第三节	压缩空气系统的运行与维护	271
第八章	技术供水系统	273
第一节	技术供水系统的作用	273
第二节	技术供水的水源和供水方式	277
第三节	水电站常用水泵的类型及应用	283
第四节	技术供水系统的设计	293
第五节	消防供水系统	304
第六节	供水系统设计计算实例	308
第七节	供水系统的运行维护	314
第九章	排水系统	317
第一节	排水系统的作用和组成	317
第二节	排水系统的设计	322
第三节	排水系统计算实例	325
第十章	主阀	330
第一节	主阀的作用和技术要求	330
第二节	主阀的型式和主要部件	331
第三节	主阀的操作方式和操作系统	342

第一篇 水轮机调节

第一章 水轮机调节的基本原理

第一节 概 述

一、自动调节的概念

在生产过程中，都用某些物理参数来表征生产设备是否正常运行。例如，某个供电装置提供的电压高低或某种用途锅炉供给蒸汽压力、温度量值，都直接表征着这些设备的工作状况。为了保证生产的正常运行，往往要求这些物理参数或保持在某个规定数值（给定值）范围内，或按照某种给定的规律变化，为此需要进行一定的操作，这种操作称之为调节。这些物理参数（如上述那些设备的供电电压或供给蒸汽压力、温度等）称作被调参数。

在水电站设备的运行中，有着多种类型的调节。其中，为了使水轮发电机组的供电频率稳定在某一范围内而进行的调节，称之为水轮机调节，它是水电站中最主要的调节内容之一。水轮机调节中的被调参数是供电频率，其调节方式是随着负荷的变化来相应改变水轮机出力，使两者保持平衡。这样就能达到维持供电频率稳定的目的。

调节按其方式不同可以分为人工调节与自动调节两类。最简单而又最古老的水轮机调节方式就是人工调节方式。在这种调节中，操作人员要不断地观察频率表计的变化，分析比较频率变化的趋势，相应地手动开闭导水机构，调节水轮机的流量，以改变水轮机的出力。其它类型的人工调节——如锅炉供应蒸汽压力的人工调节或发电机电压的人工调节等，也有着类似的操作过程。在人工调节中，操作人员承担着监测、分析、判断和执行的工作，这往往要频繁地和连续不断地进行操作，工作十分紧张，然而调节品质并不理想。因此，随着调节技术的发展，逐步产生了各种类型的自动化调节装置，取代了操作人员的繁重劳动，并且大大改善和提高了调节品质。这种以自动化调节装置实现的调节称做自动调节。在本世纪前期，人们造出了水轮机自动调节装置，实现了水轮发电机组的自动调节。

在调节中，把调节装置控制的生产设备称作被控制系统（或调节对象），由调节装置和被控制系统组成的系统称作调节系统。

调节系统根据调节原理，又可分为闭环调节系统和开环调节系统两类。闭环调节系统如图1-1(a)所示，它是具有反馈的调节系统。系统的输出量反送回调节装置的输入端称之为反馈。闭环调节系统是根据反馈量和输入量（给定值）的综合结果进行调节控制，形成闭环作用；开环系统图如1-1(b)所示，这种系统的输出信号没有反馈至输出端，即系统输出量的变化对调节作用没有直接影响。图中的扰动量是指促使被调参数偏离给定值的干扰因素。

这里有一个粗浅的例子，假如用热水管往冷水盆内掺入热水，可能有两种操作方式：一种是用一只手控制供热水的阀门，另一只手不断地搅动和感受盆中水温，当感觉到水温适合时立即关闭热水阀门；另一种方式是根据经验将热水阀开放一定大小和时间，取得所需温度。前者是闭环调节而后者是开环调节，显然闭环调节得到的水温能更加准确地符合所需的温度。

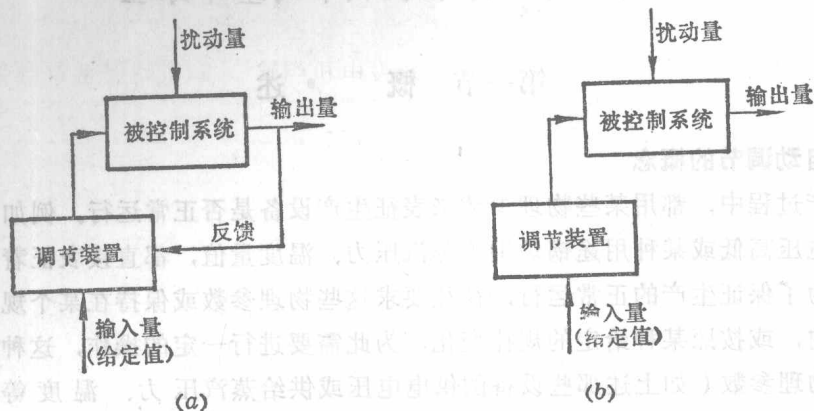


图 1-1 闭环系统和开环系统

通过对大量自动调节过程和装置的研究，目前已形成古典的和近代的调节理论。这些理论主要是研究如何保证被调节设备具有最佳的工作状态，在一定意义上就是研究如何保证被调参数与预定量值具有最小偏差的问题。水轮机调节是自动调节理论的一个应用方面，也是以研究如何保证频率具有最小偏差为目的的学科。因此不仅普遍的自动调节理论可以指导水轮机调节，而本篇所阐述的水轮机调节的一些基本原理，也可以应用到其它调节方面去。

二、电力用户对电能质量的要求

电力系统对用户供电有两个必须保证的电能质量指标，这就是供电频率和供电电压要保持在额定值的允许偏差内。我国电力系统规定，频率应严格保持在 50Hz，系统容量在 50 万 kW 以上的，频率偏差不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；系统容量在 50 万 kW 以下的，频率偏差不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

为什么对供电频率有这样高的要求呢？这是因为许多用电设备的运转情况都与供电频率有着直接的关系。例如，频率的大小直接影响着电动机的转速，当频率不准或频率波动时，电动机的转速也将不准或发生波动，这就会影响到电动机拖动的各类工农业生产设备的产品质量。机床加工的工件将达不到的光洁度；纺纱机纺出的纱线将粗细不均；造纸机生产的纸张厚薄不一；甚至电影的画面和播放的音乐也将产生严重的失真。对于一些重要的生产部门，如化工、冶炼、国防和医疗等影响更大。同时电力系统频率的大幅度波动，还将影响到并列机组间的正常同步运行，给安全供电造成重大的威胁。此外，频率的波动也会造成供电电压的波动，间接地影响到用电设备的电压。因此，保证水轮发电机组和电力系统的频率稳定在规定偏差范围内具有重大的实际意义。

三、水轮机调节的任务

促使水轮发电机组和电力系统供电频率不稳定的因素是什么呢？主要是因为用户的用

电负荷不断地变化，这种不可预见的负荷波动幅值对于大的电力系统可达系统总容量的 2~3%，对于农村小型水电站组成的孤立电力系统波动幅值还要更大。用电负荷中的有功负荷由水轮发电机组的有功功率提供，只有在两者保持平衡时，机组才能处于稳定运行状态，当负荷发生变化时，如果不及时地改变水轮发电机组的有功功率，就将引起水轮发电机组转速和供电频率的波动。就象一个在糙度变化着的道路上行走的汽车，如果不根据道路糙度及时的调节汽车油门，改变汽车的动力，车速将会发生变化的道理是一样的。由此看来，在负荷波动时，及时地相应调节水轮发电机组输出的有功功率，以保证为用户提供稳定的供电频率，这就是水轮机调节的任务。

下面，就水电生产的流程来分析一下应从何处着手来完成这一任务。通常水电生产的流程可用图 1-2 所示的框图表示。

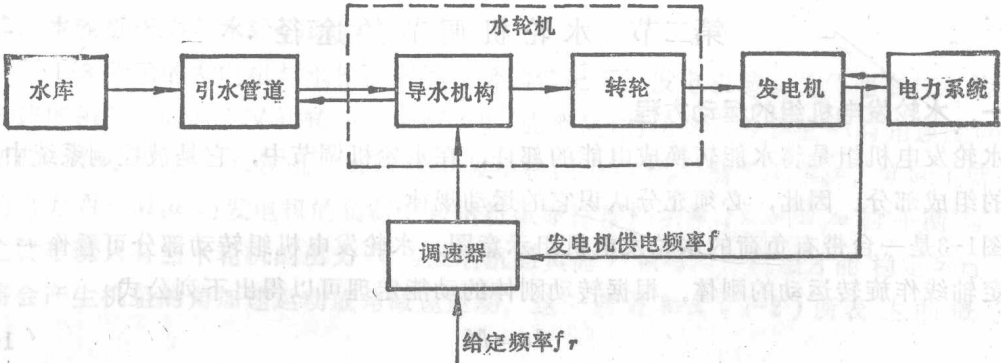


图 1-2 水电生产的流程

图 1-2 中表明，在水力发电站中通过引水管道和导水机构将水能引向水轮机，并由水轮机转轮将水能转换成机械能，再由发电机将机械能转换成电能供给用户。从前面的分析可以知道，为了维持频率的稳定必须随着负荷的波动及时地改变发电机输出的有功功率，而发电机有功功率又只能通过改变水轮机的出力（即有功功率）来进行调节。图 1-2 中的水轮机调速器正是根据这一要求设置的调节设备，它时刻监测着发电机供电频率与额定频率的偏差大小和偏离方向，同时相应地调节着通过水轮机流量的大小，不断地保持机组的出力与负荷的平衡，并使机组的转速在规定范围内运转。

由于发电机的频率与转速的关系为

$$f = \frac{pn}{60}$$

式中 f ——发电机的供电频率；
 p ——发电机的磁极对数；
 n ——发电机的转速。

已制成的发电机磁极对数 p 是固定不变的，发电机供电频率与发电机转速有着比例关系，因此将发电机的供电频率或发电机转速作为被调参数监测具有同样的意义，这也是水

轮机转速的调速器（简称水轮机调速器或调速器）命名的原因。

在水轮机调节中，把水轮发电机组以及与其连接的压力管道和电力系统的总体称作被控制系统（或叫调节对象）；把水轮机调速器与被控制系统组合的系统称作水轮机调节系统。被控制系统的特性对水轮机调节的状态也有着直接关系。

在水轮机调节中，有时不仅要按机组转速变化进行调节，还要顾及到压力管道中水压的变化。在近代调速器中，有的还引入了水压反馈信号，以使水压变化值控制在允许范围内。在这种情况下，水压也成为被调参数。

在本课程中，不仅要研究自动调速器这一装置，同时还要研究被控制系统各组成部分（机组、压力管道和电力系统）的特性及其对水轮机调节产生的影响，只有这样才能得到最佳的调节品质，才能完成水轮机调节的任务。

第二节 水轮机调节的途径

一、水轮发电机组的运动方程

水轮发电机组是将水能转换成电能的部件，在水轮机调节中，它是被控制系统中一个重要的组成部分。因此，必须充分认识它的运动规律。

图1-3是一台带有负荷的水轮发电机组示意图。水轮发电机组转动部分可看作一个围绕固定轴线作旋转运动的刚体。根据转动刚体的动能定理可以得出下列公式

$$J\varepsilon = M \quad (1-1)$$

式中 J —— 机组转动部分转动惯性矩；

ε —— 机组转动部分的角加速度，即 $\frac{d\omega}{dt}$ ，式中 ω 为机组的旋转角速度；

M —— 作用在机组转动部分上的合力矩。

合力矩 M 由两部分合成，其一是水推转轮的主动动力矩 M_t —— 简称为水轮机动力矩，

它表征着水能的大小。其二是阻止转动的力矩 —— 发电机阻力矩 M_g 。阻力矩 M_g 的主要成分是发电机定子对转子的电磁作用力矩 M'_g ，它表征着发电机负荷的大小，故也称为负荷阻力矩，其方向与转动方向相反，因此也与水轮机转动力矩 M_t 的方向相反。阻力矩的另一成分是由机组轴承摩擦和空气阻力产生的机械摩擦阻力矩 M_n ，它的方向与 M'_g 的方向相同。因此 $M_g = M'_g + M_n$ ，当发电机在满负荷运行时， M_n 只占 M_g 中很小的部分。当发电机在空载（外负荷为零）运行时， M'_g 为零，此时 $M_g =$

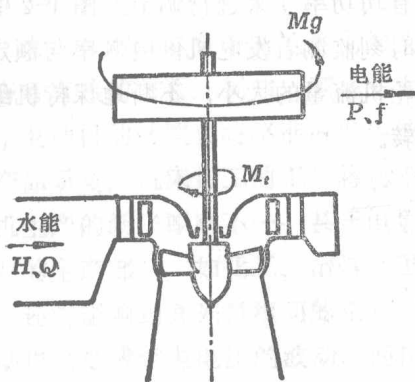


图 1-3 水轮发电机组示意图

M_n 。根据这些分析，可以写出如下形式的水轮发电机组运动方程

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

由这个公式，可以得出以下几点结论：

(1) 当水轮机动力矩 M_t 与发电机阻力矩 M_g 相等时， $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，水轮发电机组的转速处于稳定运转状态。

(2) 当发电机阻力矩 M_g 小于水轮机动力矩 M_t 时， $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ，水轮发电机组将产生角加速度运动。反之， $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ，将产生角减速度运动。角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ 的量值与两力矩差值 $(M_t - M_g)$ 成正比，与机组转动部分惯性矩 J 成反比。

(3) 在发电机空载稳定运行时，水轮机动力矩 M_t 与发电机机械摩擦阻力矩 M_m 相等。这也就是说虽然发电机外负荷为零了，水轮机仍然需要付出一部分能量来平衡发电机机械摩擦阻力所消耗的能量。

二、水轮机出力与水轮机动力矩

在图 1-3 所示的发电机与水轮机同轴连接的情况下，发电机转动的角速度与水轮机转动的角速度相等。同时，又知转动物体所产生(或消耗)的功率 P 为力矩 M 与角速度 ω 的乘积，即 $P = M\omega$ 。因此，水轮机动力矩 M_t 与发电机阻力矩 M_g 平衡与不平衡，实际上就是水轮机的出力 $N = M_t\omega$ 与发电机的负荷(包括机械摩擦损耗功率) $P = M_g\omega$ 的平衡与不平衡。这就是说只有当水轮机的出力 N 与发电机的负荷 P 相等时，机组才能稳定运行，否则，将会产生机组的角加速运动或角减速运动。这一点是和式(1-2)所表达的概念一致的。

水轮机的出力 N 可以通过对水能转换的分析得出下式

$$N = 9.81\eta QH \quad \text{kW} \quad (1-3)$$

式中 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。

由于水轮机出力 N 能表达成 $N = M_t\omega$ ，因此还可以得出以下的公式

$$M_t\omega = 1000\eta QH \quad \text{kg}\cdot\text{m/s} \quad (1-4)$$

$$M_t = \frac{1000\eta QH}{\omega} \quad \text{kg}\cdot\text{m} \quad (1-5)$$

由式(1-3)和式(1-5)可以粗略看出，如果要想改变水轮机的出力 N 或水轮机动力矩 M_t ，合理可行的办法只有改变进入水轮机的流量 Q ，这是因为水轮机的效率 η 不易在运转中任意调节，而水头的改变不仅在技术处理上比较困难，而且也是不经济的。

水轮机角速度 ω 发生改变时，水轮机效率 η 与流量 Q 都会发生改变，利用式(1-5)来分析 M_t 与 ω 的关系显然是困难的，因此必须利用水轮机的某些原理将该式加以变换。

在水轮机相似理论中有着下列表达单位转速 n_1 和单位流量 Q_1 的公式

$$n_1 = \frac{nD_1}{\sqrt{H}} \quad (1-6)$$

$$Q'_1 = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \quad (1-7)$$

由此可以得出

$$n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D_1} \quad (1-8)$$

$$Q = Q'_1 D_1^2 \sqrt{H} \quad (1-9)$$

引用 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，并将式 (1-8) 与 (1-9) 代入式 (1-5) 中得到下式

$$M_t = K \eta \frac{Q'_1}{n'_1} D_1^3 H \quad \text{kg} \cdot \text{m} \quad (1-10)$$

式中 K ——系数， $K=9.54 \times 10^3$ ；

η ——水轮机效率；

n'_1 ——单位转速 (r/min)；

Q'_1 ——等开度线上相应于 n'_1 的单位流量 (m^3/s)；

D_1 ——转轮标称直径 (m)。

由此，应用水轮机综合特性曲线中的导叶等开度线，查出各 n'_1 相应的 Q'_1 及 η ，再利用式 (1-8)、(1-10) 就可以很容易地得到相应于各个导叶开度下 M_t 与 n 的关系曲线。图 1-4(a) 就是这样一组曲线的例子。

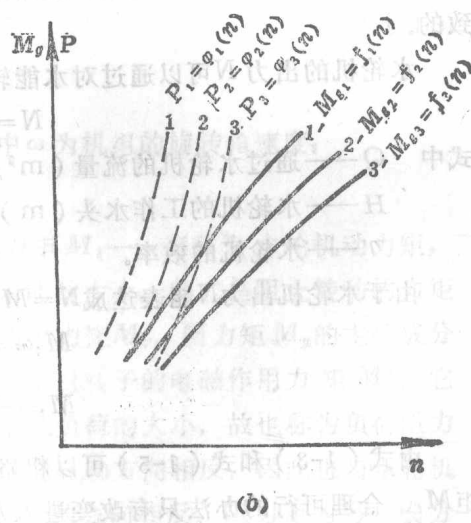
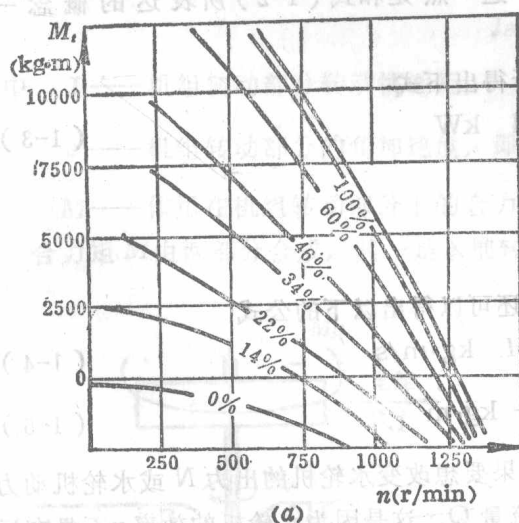


图 1-4 水轮机动力矩特性与发电机负荷阻力矩特性

(a) 水轮机动力矩特性；(b) 发电机负荷阻力矩特性

从图 1-4(a) 中可以看到：

(1) 当导叶开度为定值时，水轮机动力矩随转速的增加而减少。

(2) 当转速不变时，在水轮机出力限制范围内，水轮机动力矩随导叶开度增加而增加。

三、发电机负荷特性与负荷阻力矩

研究发电机负荷特性的目的是要了解发电机的负荷（用户耗用的功率）与发电机的供电频率 f （或发电机转速 n ）之间存在的关系。由于发电机的阻力矩 M_g 表征着发电机负荷的大小（忽略了机械摩擦阻力矩 M_m 的影响），因此也就是为了求得 M_g 与发电机供电频率 f 之间的关系。

一个用电设备的额定功率与该用电设备实际所消耗的功率是不完全一致的。这是因为后者的大小还与供电的频率和电压有关。这里所关心的是用电设备所消耗的功率——实际负荷的大小与供电频率 f 之间存在的关系。

例如，一台额定功率为 10kW 的离心式水泵，在一定扬程下工作，如供电系统频率为 50Hz 吸取的功率为 10kW，那么，当供电系统频率为 55Hz 时，即使供电电压不变，它吸取的功率却会增加到 13kW 左右。这是由于频率的升高引起了水泵转速的增加，抽水流量也增加了的缘故。离心水泵消耗功率近似与频率的三次方成正比。

不同类型的用电设备其消耗功率与供电频率的关系不同：有的与频率没有直接关系，有的与频率成正比，还有一些与频率成平方、三次方甚至更高次方的关系。因此许多用户各种类型用电设备综合起来的负荷——消耗的总功率与频率必然存在着一定的关系。同时发电机转速变化（频率变化）对供电电压会带来影响（通常发电机转速升高电压随之升高），这也将间接影响到负荷量值的变化。综合这两方面的影响，大的电力系统综合负荷大致有与频率成平方到三次方左右的关系，小的电力系统则要根据系统中各类负荷所占比例而定。

图 1-4(b) 中虚线所表示的是某一发电机所带负荷的综合特性，三根虚线为同一发电机在不同时刻中，因用电设备的组合或数量发生改变而形成的负荷特性曲线。曲线 $P_1 = \varphi_1(n)$ 、 $P_2 = \varphi_2(n)$ 、 $P_3 = \varphi_3(n)$ 分别对应于一个设备组合情况，从这里可以看到，综合负荷通常的情况是：在用电设备组合不变的情况下，综合负荷（即从发电机吸收的总功率）大小随发电机转速增加而增加。

那么，发电机负荷阻力矩 M_g 与发电机转速 n 的关系又是怎样的呢？发电机输出功率 P 与发电机阻力矩有下列关系（忽略了机械摩擦阻力矩的影响）

$$P = M_g \omega \quad (1-11)$$

而发电机旋转角速度又可以用下列式子表达

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi}{30} \left(\frac{60f}{p} \right) \quad (1-12)$$

即

$$M_g = \frac{p}{2\pi} \frac{P}{f} \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可以推论出：如果发电机的输出功率 P 与频率 n 次方成比例，发电机的阻力矩 M_g 将近似有着与频率的 $(n-1)$ 次方成比例的关系。因此，如果知道了某类负荷或某电力系统的负荷与频率的关系，也就不难得知它们所产生的阻力矩与频率的关系了。

图 1-4(b) 中的实线 $M_{g1} = f_1(n)$ 、 $M_{g2} = f_2(n)$ 、 $M_{g3} = f_3(n)$ ，表示出同一发电机在不同时刻中，因组合或数量发生改变而形成的三个用电设备所对应的发电机阻力矩（或称负荷

阻力矩)特性曲线。从图1-4中可以得出这样的结论:

(1) 综合负荷所引起的发电机电阻矩 M_g 的特性通常是:在用电设备组合不变的情况下, M_g 随着发电机转速的增加而增加。

(2) 如果维持发电机的转速不变,当用电设备组合发生改变时, M_g 将随之发生变化。

四、水轮机调节的途径

将作用在同一机组上的水轮机动力矩特性曲线和发电机电阻矩特性曲线绘制在一起,可以得到图1-5所示的水轮机调节平衡特性图。

利用图1-5,可以归纳出以下四种水轮发电机组变化和调节的情况:

1. 机组稳定运转的状况

从式(1-2)可知,当机组上所作用的水轮机动力矩 M_t 与发电机电阻矩 M_g 相等时, $\frac{d\omega}{dt} = 0$,机组处于稳定运转的状态。设原水轮机导叶开度为 α_s ,等开度线 α_s 给出了水轮机动力矩 $M_t = f(n)$ 的变化关系。如果此时发电机负荷的对象为第二种设备组合情况,

发电机电阻矩由曲线 $M_{g2} = f_2(n)$ 表示,这两条曲线的交点 a 正是发电机组此时的工作点。这一点对应的 M_t 与 M_g 相等(即 $M_t = M_g = M_a$),水轮发电机组以 a 点所对应的转速 n_0 稳定运行。

2. 无调节状况

如果用电设备发生改变,而导叶开度不变时,水轮发电机组的转速将发生变化。若转速变化引起的调节过程结束后,水轮机动力矩 M_t 能与此时用电设备所对应的发电机电阻矩 M_g 平衡,则机组能在一个新的稳定转速下运行。

例如,当机组在 a 点稳定运行时,若用电设备减少了,发电机电阻矩在图1-5上即变为由 $M_{g3} = f_3(n)$ 表示。在用电设备减少后的一瞬间,机组转速还是 n_0 ,所以 $M_t = M_a$,但

M_g 却变成了 M_b ,即

$$M_t = M_a > M_b = M_g$$

由式(1-2)可知,此时 $\frac{d\omega}{dt} > 0$,在过渡过程中,机组将会产生角加速运动,转速升高。随着转速增加, M_t 将由 M_a 值沿等开度线所表达的趋势逐渐减少,而 M_g 由 M_b 值沿曲线 $f_3(n)$ 所表达的趋势逐渐增加,最后在 b' 点交会, M_t 与 M_g 重新平衡,机组转速不再变化,以转速 n_1 稳定运行, b' 点成为机组一个新的工作点。

相反,若用电设备增加了,阻力矩变为由 $M_{g1} = f_1(n)$ 表示,机组将转移至 c' 点工作,机组转速变为 n_2 。

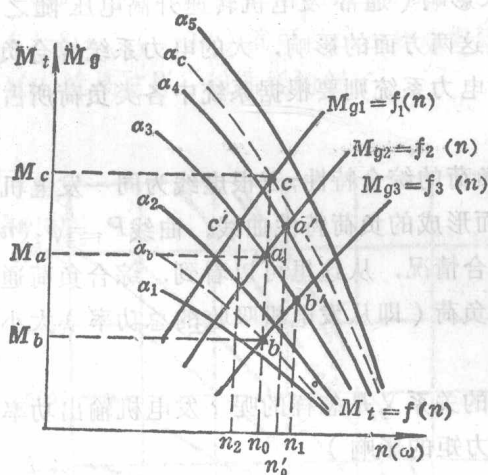


图 1-5 水轮机调节平衡特性图

在上述过程中, 导叶开度没有随用电设备变化进行调节, 故称为无调节状况。此种状况下, 水轮机及负荷能通过机组转速变化重新自动平衡的能力称自调节能力, 这是调节对象的一个重要特性。但仅仅依靠自调节能力来保持机组力矩平衡是不行的, 因为机组转速偏离值可能很大, 例如在导叶开度不变时, 机组出力从额定值减到零, 相应机组转速可能由额定值增加到1.8~2.4倍, 这显然是不能满足系统频率稳定要求的。

3. 人为变速调节状况

当机组稳定运行在 a 点时, 如果 a 点对应的转速 n_0 达不到要求的机组转速, 则可以人为地改变导叶的开度, 增大或减少水轮机动力矩, 从而改变机组的稳定运行转速。例如, 在用电设备不变的情况下, 只要把导叶开度由 α_3 增大到 α_4 , 机组转速就能由 n_0 增加到 n'_0 , 机组改在新工作点 a' 稳定运行。虽然增大导叶开度产生了一个动力矩增量 ΔM_t , 但由于转速变大了, 用电设备也产生一个阻力矩增量 ΔM_g , $\Delta M_g = \Delta M_t$, 因此机组力矩依然是平衡的。

4. 保持机组转速不变的调节状况

怎样才能使机组转速在负荷变动后仍能维持在原来的数值上呢? 从图1-5可以看出, 这就需要采用一定的调节机构去相应改变导叶的开度, 利用导叶开度变化增减动力矩 M_t , 使之与负荷改变后的阻力矩 M_g 相平衡, 维持转速不变。例如机组原在 a 点运行, 在用电减少, 阻力矩变为 $M_{g3} = f_3(n)$ 时, 若相应把导叶开度减少到 α_0 , 则机组转速仍能维持在 n_0 。相反, 在用电增加到 $M_{g1} = f_1(n)$ 时, 相应开启导叶至 α_c , 也能维持机组转速不变。

以上用力矩平衡的论点分析水轮机调节是与有功功率平衡的论点相一致的, 但是前者更为准确合理。

这些分析已经指明了水轮机调节的途径, 这就是: 如果在负荷不变的情况下, 想要改变机组的转速, 必须人为地去改变导叶的开度; 如果要在负荷变化的情况下维持转速不变, 则要随着负荷的变化, 相应地改变导水机构(或喷嘴)的开度。

对于转桨式水轮机, 为了提高水轮机的效率, 在水轮机调节过程中, 不但要考虑转速的变化与维持, 而且要保证桨叶角度与导叶开度符合一定的协联关系。这样就必须对水轮机导叶和桨叶同时进行双重调整, 这种类型的调速器称为双重调节调速器。

冲击式水轮机的针阀与折向器都需要进行调节, 因此也具有双重调节的要求。

第三节 调速器的构成与环节

一、调速器的概念

调速器从调节方式上可以分为手动调速器与自动调速器两大类。自动调速器又可以其元件结构的不同分为机械液压型和电气液压型两类, 前者主要由机械液压部件组成, 后者由电子元件构成的电气回路和作为执行机构的机械液压部件共同组成。

下面, 首先介绍手动调速器和最简单的自动调速器。

(一) 手动调速器

手动调速器是最简单的水轮机调节装置, 它属于人工调节的类型。目前我国许多单机

200~300kW以下的水轮发电机组，仍然采用这样的调速器，其结构原理如图1-6所示。

手动调速器主要包括调速手轮、减速机构、调速轴和推拉杆。操作人员转动手轮，通过减速机构减速后，转动调速轴，进而带动推拉杆和水轮机控制环来改变导叶的开度。这样的手动调速器准确地说只是调速装置中执行机构的一部分，其它大部分调节任务都由操作人员来承担。

操作人员应做哪些工作呢？首先，操作人员为了监视机组转速，要不断地观察转速表（或频率表）并将实际转速与额定转速值进行比较计算，看转速是偏高还是偏低了，偏了多少，从而判断应该开启还是关闭导水叶，以及开或关多少合适。判断之后，便操纵手动调速器控制导水叶，使之开或关到应有的程度。操作完之后，还要再观察转速表，检验自己刚才的操作是否已使水轮发电机组转速回到了额定值，如已回复，则调节完毕。如转速还未达到额定值或已发生了超调，则还要根据当时实际存在的偏差再进行调节，直到转速回复到额定值为止。

熟练程度不同的操作人员所进行的调节效果是不同的。图1-7表示出不同操作效果下，导叶开度变化曲线。当发电机负荷有一个较大的变化引起机组转速突然变化时，例如负荷突然减小，没有经验的操作人员可能经过几次反复开关导叶的操作，才能使机组转速回复到额定值，其操作过程如图1-7(b)所示（导叶开度 α 的变化反映操作规律），显然这样操作引起的转速波动幅度将会较大，波动时间较长，波动次数也较多。

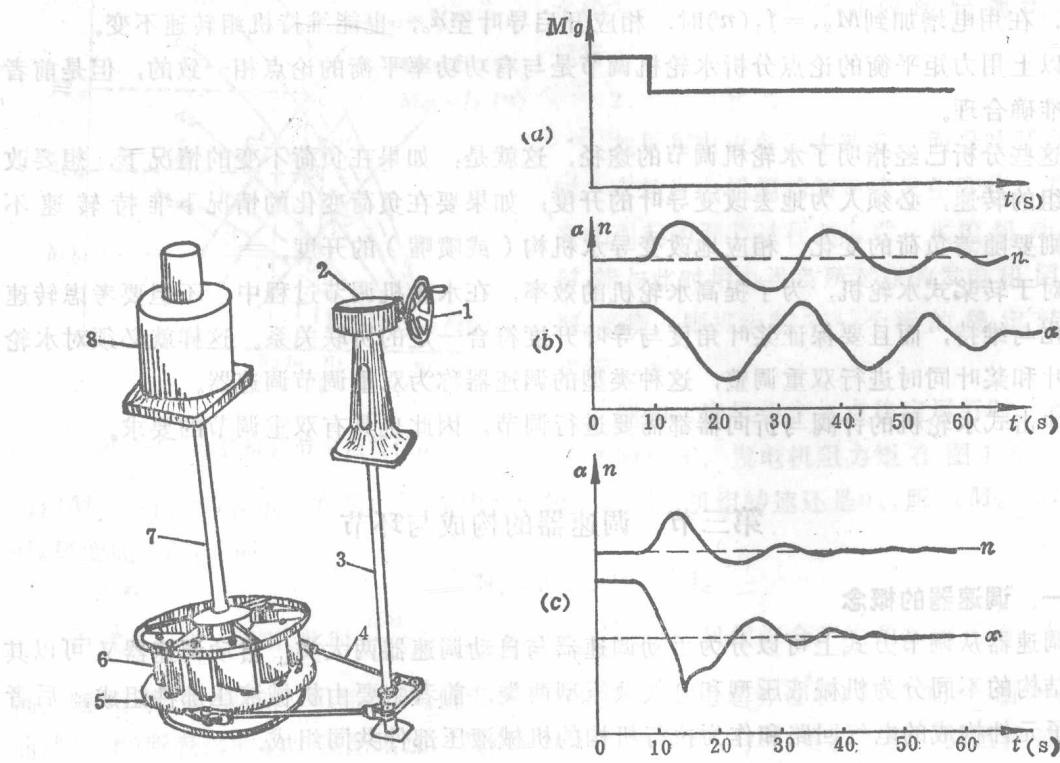


图 1-6 手动调速器结构

图 1-7 手动调节转速变化过程曲线

1—调速手轮；2—减速机构；3—调速轴；4—推拉杆；
5—控制环；6—活动导叶；7—主轴；8—发电机

有经验的操作人员可能采用图1-7(c)所示的操作过程, 由于他估计了转速变化的趋势采取一定规律的操作, 因此能减小机组转速的波动幅度、波动时间和波动次数。由此看来, 调速操作的规律是否正确也是十分重要的。

将以上操作的过程归纳起来, 可以看出“人工调节”的实质包含着五个内容, 即:

- (1) 不断监测机组转速。
- (2) 将目测所得之转速值与额定值进行比较和计算。
- (3) 视偏差的方向、大小和变化速度, 按最好的规律发布操作命令。
- (4) 执行命令, 操作导水叶。
- (5) 检验调节效果, 并进一步加以修正。随着科学技术的进步, 人们以机电部件模拟人的功能, 完成以上五个内容的操作, 创造了自动调速器, 实现了自动调节。

(二) 直接作用式调速器

最简单的自动调速器是以离心摆进行控制的直接作用式调速器, 图1-8是它的结构示意图。

这种调速器的关键部件是离心摆。图1-9是最简易离心摆的示意图, 它由四根联杆1、两个重块2、平衡弹簧3、转动套4和转轴5所组成。四根联杆铰接成菱形, 其上部与转轴顶端作平面铰接(仅能在垂直平面内转动), 下部与转动套作平面铰接, 转动套随离心摆转动, 同时还可沿转轴上下滑动。两侧联杆之间的铰接点上各装有重块2, 并有弹簧3与转轴5连接。水轮机大轴通过传动带驱使离心摆转轴转动, 转轴的转速与水轮机转速成比例。转轴旋转时, 上述各件都随之转动。转轴转速变化, 重块产生的离心力便改变对弹簧的拉力, 重块向外伸张或向内收缩, 带动转动套沿转轴上下滑动。

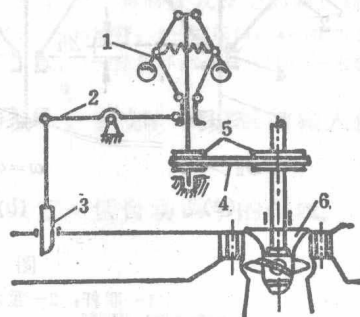


图 1-8 直接作用式调速器示意图

1—离心摆; 2—传动杆; 3—水门; 4—传动带; 5—带轮; 6—水轮机

水轮机为额定转速时对应的离心摆转速称为离心摆的额定转速, 其角速度为 ω_r 。按动力学原理, 重块旋转所产生的离心力 F 与其质量 m 、旋转半径 r 和角速度 ω 的平方成正比, 即 $F \propto mr\omega^2$ 。若转轴角速度为 ω_r 时, 离心摆处于图1-9(b)所示的位置; 当转轴转速升高一个 $\Delta\omega$ 时即 $\omega > \omega_r$ 时, 重块的离心力便增大, 并克服弹簧拉力和重块重力向外伸张, 转动套沿转轴向上移动一个相应距离 $+\Delta h$, 离心摆处于图1-9(a)所示的位置; 当转轴转速降低一个 $\Delta\omega$ 时即 $\omega < \omega_r$, 重块的离心力便减小, 在弹簧拉力和重块重力的作用下向内收缩, 转动套向下移动一个相应距离 $-\Delta h$, 离心摆处于图1-9(c)所示的位置。

通过实验可知, 转动套的位移 h 是按与转轴转速 ω 近似成正比例关系变化的, 图1-9(d)给出了反映这一关系的离心摆特性曲线。

图1-8所示直接作用式调速器的调节过程如下。

假定机组在额定的稳定工况下运行, 机组与离心摆均处于额定转速, 水门在转动套的