

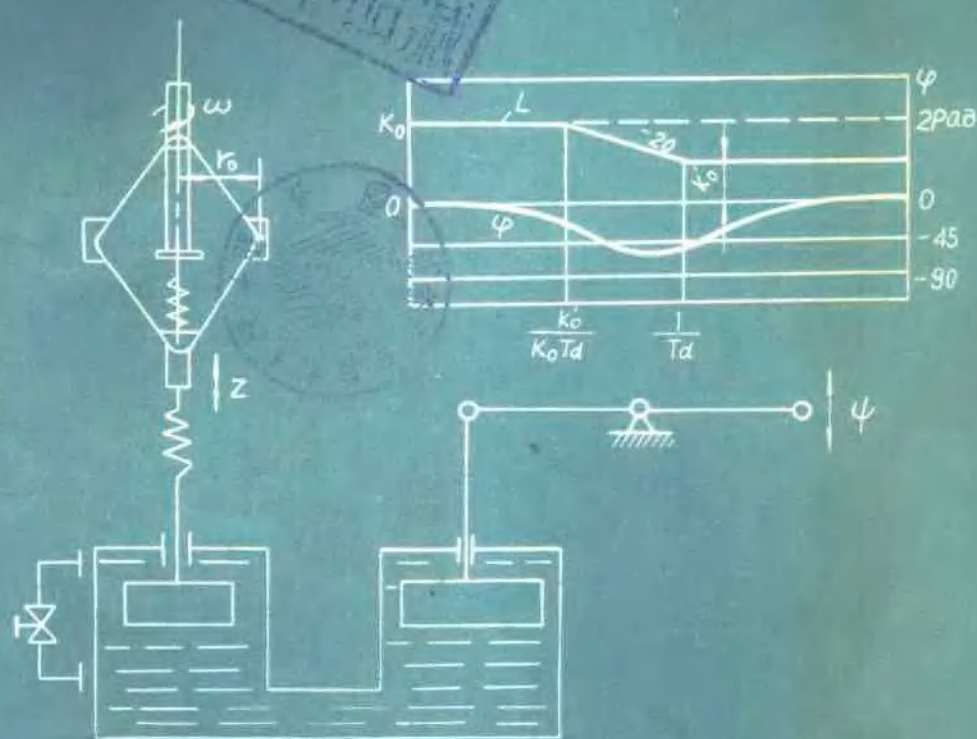
- 891174

水轮机调节系统的设计与计算

SHUIJUNJI TIAOJIEXITONG DE SHEJI YU JISUAN

(苏) 皮沃瓦洛夫 著

连 希 德 译



机械工业部哈尔滨大电机研究所

一九八六年四月

水轮机调节系统的设计与计算

(苏) 皮沃瓦洛夫 著

连 希 德 译

机械工业部哈尔滨大电机研究所

前 言

苏共 24 大关于发展苏联国民经济 1971~1975 年五年计划规定要以巨大的步骤实现科学技术革命，它开创了生产方式根本转变的可能性。规划还决定要以超前的速度发展决定技术进步的部门。这些部门诸如动力、仪表制造、自动化设备和计算机的产量将在五年后增加 67%。

因此，现在特别注意水电机组的自动调节与控制问题。水电机组自动化的发展方向是建立本质上全新的自动化系统，加速改进和替换陈旧的技术，这就要广泛采用电气自动化和无线电电子学的最新成就。

本书旨在使广大工程技术人员了解现代水轮机调节系统的设计、计算与研究的实际情况。

书中内容分为六章。在第一章叙述了关于水轮机调节的基本概念。第二章叙述了自动调节动力学。其中主要注意力集中在成功地应用在调节系统设计与计算实践中的频率法。频率法在设计与研究具有电液调速器的系统中是特别有价值的。最近十年来，电液调速器在列宁格勒金属工厂（ЛМЗ）的生产中占有优势地位。在本章还研究了典型环节的动态特性，简短地叙述了稳定判据，调节系统的校正方法以及调速器参数的选择。第三章介绍了目前 ЛМЗ 厂新生产的大型水轮机调速器单个部件的结构原理图。第四章介绍了以频率法为基础的调速器参数选译和调节系统稳定性的精确计算方法。第五章介绍了各水轮机公司生产的调速器方框图的比较评价，给出了调速器放大系数的选择和提高灵敏度的建议，并介绍了 ЛМЗ 厂研制的新电液调速器的原理图。第六章叙述了调速器及调节系统的试验室和真机试验方法。书中所用物理单位均按国际单位制（SI）选取，而调速器和水轮机参数的定义和符号均符合《水轮机调速系统试验国际规程》的建议。

2008/107

译者的话

苏联 Пивоваров 著《水轮机调节系统的设计与计算》一书较全面地介绍了苏联水轮机调速器设计与制造的现状及这一时期的产品，并据根自动调节原理研究分析了各种调速器的性能，介绍了设计与计算的方法及有关的数据。该书作者在工厂从事调速器研究与设计多年，因此，书中内容具有很大的实用价值。我们将它翻译出版，供同行们在实际工作中参考。

在翻译过程中，对于原文中一些明显的印刷错误均予以改正。书中的名词术语基本按原意译出。有些术语与国内所用术语差别较大，为便于理解，一律按我国常用术语译出。个别一些不常见的术语，为避免误解，在译文之后注出原文。

由于该书内容涉及较广，给翻译带来许多困难，不足之处乃至谬误，在所难免，望读者指正。

承担本书校核工作的是：李连贵（第一章）；安永重（第二章）；彭贵轩（第三章）；周寿棋（第四章）；李朝东（第五章）；王继伯（第六章）。全书由徐思进同志总校订。

谨向真诚帮助和指导过我的李培深同志致谢。

1985年3月

内 容 提 要

本书阐述了自动调节系统的动力学原理，研究了大型水轮机现代电液调速器的结构原理图，在利用对数幅频和相频特性基础上，介绍了调速器的方框图和参数的选择以及调节系统稳定性的计算方法，列举了在试验室及真机条件下调速器和调节系统的试验方法。

本书可供研究水轮机调节系统设计计算和试验问题的工程技术工作者参考。

目 录

前言

第一章 水轮机调节的基本概念

1、自动调节系统	(1)
2、水轮机调节的一般概念及调速器的用途	(2)
3、水发电机组和调速器的静态特性	(3)
4、水发电机组在电网中的并联运行	(6)

第二章 自动调节动力学基础

5、线性及非线性环节与系统	(9)
6、稳定性和过渡过程品质	(10)
7、传递函数	(12)
8、频率特性	(14)
9、典型环节的动态特性	(16)
10、稳定判据	(36)
11、确定闭环系统频率特性的诺模图	(41)
12、调节系统的校正方法	(44)
13、参数平面上的稳定域边界	(51)
14、调节器结构与参数的选择	(53)

第三章 水轮机调速器的结构原理图

15、调速器的分类	(59)
16、离心飞摆	(59)
17、液压缓冲装置	(61)
18、具有油缓冲器的离心飞摆	(63)
19、电气飞摆	(66)
20、电气缓冲器	(68)
21、液压放大器和接力器	(70)
22、电放大器	(77)
23、PM型机械液压调速器原理图	(82)
24、PKM型机械液压调速器原理图	(85)
25、ЭГР—2M型电液调速器电气原理图	(87)
26、ЭГРК—250—3型电液调速器控制柜的机械液压原理图	(88)

27、ЭГРК—100 (150) —4 型电液调速器控制柜的机械液压原理图	(91)
28、ЭГР—100 (150) —4 型电液调速器控制柜的机械液压原理图	(91)
29、ЭГР—И—150—10 型电液调速器原理图	(93)

第四章 水电机组调节系统的稳定性计算和参数选择

30、对调速器的要求	(97)
31、水电机组传递函数的推导	(99)
32、传递函数各系数的确定	(109)
33、选择调速器方框图及参数的准则	(112)

第五章 调速器方框图的比较评价

34、缓冲式调速器方框图的分析	(116)
35、缓冲式调速器放大系数的选择	(119)
36、缓冲式调速器的死区及其消除方法	(124)
37、具有按速度和导数(加速度)作用的调速器	(128)
38、具有按导数附加作用的缓冲式调速器	(132)
39、具有按被调节量积分作用的调速器	(134)

第六章 调节系统的真机试验方法及其结果的分析

40、试验目的及对象	(138)
41、调速器和单个环节静态特性的确定	(138)
42、接力器速度特性和放大系数的确定	(140)
43、调速器调节参数的确定	(142)
44、调速器死区的确定	(144)
45、水电机组参数的确定	(146)
46、频率特性的确定	(148)
47、导水机构接力器速度特性的分析	(152)
48、频率特性的分析	(154)
参考文献43种 (略)	

第一章 水轮机调节的基本概念

1 自动调节系统

调节的任务在于以一定的精确度将称之为被调节量的任意物理量保持为给定值。被调节量可以为任意物理量，它可以是转速，压力，液面，电流，功率，电压，温度等等。

首先，我们只限于所有调节系统特有的一些术语，而不涉及它们的实质与结构。

其工况被调节的机组称为调节对象，而实现调节作用的装置称为调节器。调节对象与调节器组成自动调节系统。当然，调节对象应该有某个调节机构，借助于它，在外部扰动作用于对象时，调节器可以改变对象的工况，以保持给定的被调节量的值。

现在来研究一下自动调节器应包含一些什么样的元件或环节。为了实现调节任务，调节器首先应该包含有被调节量的测量，并将被调节量与给定值进行比较的环节。该环节称为敏感元件。当被调节量与给定值存在偏差时，调节器发出一定的，称作调节作用的信号，它通过转换—放大机构作用于调节机构，并改变调节参数。调节作用方向的选择是使得调节量与给定值的偏差减小。最简单的自动调节系统可用图1的方框图表示。

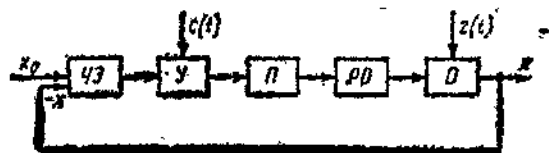


图1 最简单的自动调节系统方框图

x_0 —被调节量的给定值； $\Phi\Theta$ —敏感元件； Y —放大器； Π —转换器； PO —调节机构； O —调节对象（大多数情况下调节机构在结构上已包括在调节对象里面）； Z —扰动作用（箭头表示信号通过的方向）

应该注意，调节系统中的作用是按闭环回路传递的。在图1中，调节对象的输出端与调节器的输入端相连。这种联系称为主反馈。以

与调节器中用于不同目的的附加反馈相区别。

引起被调节量与给定值偏差的原因是作用于调节对象的扰动作用。正是存在扰动作用才有自动调节的必要。如果没有扰动作用，则系统将要进入平衡状态，并停留在这一状态，不需要进一步调节。这样，在调节水电机组转速时的扰动作用就是：例如发电机负荷的变化或者水电站实际水头的波动而引起的水轮机力矩的变化。在任何水库中进行液面调节时，引起水库液面变化的流出和流入液体速度的变化就是扰动作用。

在所研究的情况下，被调节量的给定值 $x_0 = \text{常数}$ ，但是，有些自动化系统，其被调节量或输出量 $x_{\text{出}}(t)$ 以允许的误差（精度）重现按任意规律变化的输入量 $x_{\text{入}}(t)$ 的变化。在这里，不需使 $x_{\text{出}}(t) = x_{\text{入}}(t)$ 。

常常遇到 $x_{\text{出}}(t) = K \cdot x_{\text{入}}(t)$ 这样的系统，式中， K —重现给定规律的系数。这样的系统称为随动系统。在水轮机调速器中根据导水机构开度来确定转桨式水轮机转轮叶片的安放角以保证对给定开度的水轮机效率为最高的所谓协联器装置就是随动系统的一例。

图2示出这种随动系统的原理图。接力器1用于转动水轮机转轮叶片，并且被供以压力为 P_0 的压力油的配压阀2所控制。接力器与配压阀彼此间以传动杠杆3联系，起着反馈和比较元件的作用。通过传动杠杆，配压阀2与给定型线的凸轮4相联。凸轮与自动调速器控制的水轮机导水机构接力器5的活塞杆刚性连接。

该系统以下列方式进行动作：当接力器5的活塞移动时，例如向右移动，凸轮4通过传动杠杆3使配压阀2向上移，压力油由配压阀2进入接力器1的上腔，而它的下腔与排油管相连。结果使接力器1的活塞向下移，并使转

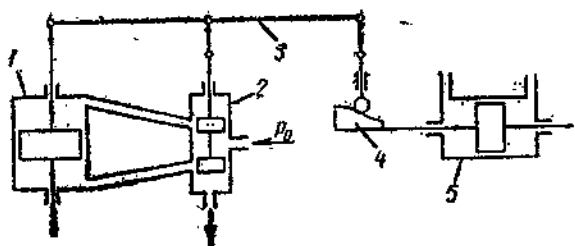


图2 转桨式水轮机协联器随动系统原理图

轮叶片安放角改变。同时，接力器1的活塞通过传动杆3将配压阀2恢复到原来的中间位置。这样，凸轮4的型线便保证了事前所给定的转轮接力器位置与导水机构接力器位置的关系。这种系统是实际应用的随动系统。

随动系统在所有工业部门的过程自动化中得到广泛应用。

2 水轮机调节的一般概念及调速器的用途

水轮机通常是交流发电机的原动机，并与它一起组成一个动力机组，将水能转变成电能，并通过电网送给用户。

在发电机发出的电能质量的技术要求中，规定了电流频率的实际值的偏差不应超出什么样的范围，其中包括不大于 $\pm 0.2\%$ 。为了满足这个要求就提出了调节的问题。在这种情况下，被调节量是电流的频率 f ，或是机组转子的转速 n （以转/分计），它们之间的关系如下

$$f = \frac{pn}{60} \quad (\text{赫兹}) \quad (1.1)$$

式中， p —发电机的极对数。

由力学知，水电机组转子的转动取决于机器的基本方程式

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_e \quad (1.2)$$

式中， I —转子的惯性矩；

ω —转子旋转的角速度；

M_t 及 M_e —分别为水轮机和负荷的力矩。

根据式(1.2)，为了保持速度 ω 不变，

这时导数（加速度） $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，必须在任意的

时间区间内保持力矩 M_t 及 M_e 相等。在机组工作时， M_t 及 M_e 的大小在很大范围内都是不断变化的。负荷力矩随电能消耗的变化而变化，而水轮机力矩主要是随水电站作用水头的变动而变化。

自动调节的任务就在于使得在负荷及其他扰动作用变化时保持等式 $M_t = M_e$ 。

水轮机发出的力矩取决于水的流量 Q ，转子旋转角速度 ω 以及作用水头 H ，并由下式确定

$$M_t = \gamma \frac{QH}{\omega} \eta_t \quad (1.3)$$

式中， γ —水的重度；

η_t —水轮机效率。

由此可见，当 $\omega = \text{常数}$ 时，水轮机的力矩可以用改变水的流量 Q 或水头 H 的方法来改变。在实际条件下，自动地改变作用水头实际上是不可能的，所以采用改变水的流量的方法来调节水轮机的力矩，水的流量就是所谓的调节参数，借助于它可使被调节量（机组转速）保持在给定的范围内。改变水的流量可以用与水轮机型式相应的调节机构来实现。

在大、中型水轮机中，为了移动调节机构，采用了可产生所需作用力达数百吨甚至更大的特殊液压接力器。

在不同的发电机负荷时，保持水电机组的转速在给定的范围内，可利用自动调速器来实现。它用相应的方法移动调节机构以改变通过水轮机水的流量。

实际被调节量（转速）的测量，并将它与给定值进行比较，形成控制作用，并移动调节机构的装置和仪器的总和，称为水轮机转速自动调节器或简称调速器。也就是说，包括由转速测量装置到导水机构接力器在内的所有装置都属于调速器。

大多数的自动调节系统都是根据被调节量 ω 与其给定值的偏差进行调节的原理来制造的。基于该原理的调速器称为具有按速度作用的调速器。这时，调速器应该能够作用到水轮机

的调节机构，以减小或者完全消除被调节量的偏差。

另一种调节原理是按扰动来调节。在这种情况下，例如力矩差的出现就可用作移动调节机构的指令。但是应该指出，水轮机的调节仅仅根据扰动是不可能的，因为在这种情况下，没有完成调节的基本任务——保持转子的旋转角速度在给定的范围内。为了完全解决水电机组转速的自动调节问题，按扰动的作用必须与转速偏差本身一起引入。这种调速器称为联合调速器。

最近，很多国家的水轮机公司广泛地采用各种形式的附加作用调速器：按导数（加速度），积分，导数和积分，以及按二阶导数等等，并开始采用按速度及负荷作用的联合调速器。

应该指出，在调速器中引入附加作用不是为了完成调节任务，而是为了改善调速器及自动调节系统的工作质量指标。

3 水电机组和调速器的静态特性

现在来研究一下向电网任意用户供电的一个机组，从水轮机特性开始研究。

根据公式 (1.3) 水轮机的力矩是流量、转速、水头及效率的函数，即 $M_t = f(Q, n, H, \eta_t)$ 。如果考虑到通过水轮机的流量取决于调节机构的开度 a ，则 $M_t = f(a, n, H, \eta_t)$ 。这个关系式被称为水轮机的静态特性，通常也把它称为力矩特性。但是在一个图上提供这样的关系是不可能的，因此，通常局限于对于一定的水头 H_0 而绘制的 $M_t = f(a, n, \eta_t)$ 形式的函数。对于其他水头值，该曲线可借助于已知公式来重新绘制。

水轮机的静态特性 $M_t = f(a, n, \eta_t)$ 可以根据模型水轮机综合特性的数据进行绘制。在综合特性上，以转化为 1 米水头及 1 米转轮直径的 n_1' 及 Q_1' 的座标中绘出了模型水轮机调节机构等开度曲线 a_m 及等效率曲线 η_m 。

图 3 示出了混流式模型水轮机的综合特性图。

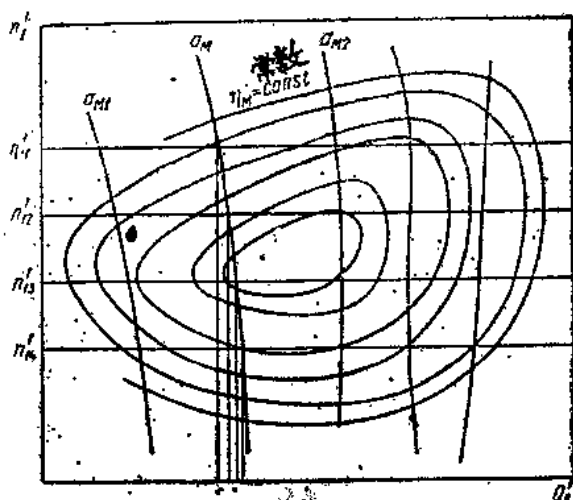


图3 混流式模型水轮机的综合特性图

根据相似条件，通过水轮机的实际流量 Q （米³/秒）及实际转速 n （转/分）对于给定的转轮直径 D （米），及水头 H （米）与单位流量 Q_1' 及单位转速 n_1' 有如下关系

$$Q = Q_1' \sqrt{H} D^2 \quad (1.4)$$

$$n = n_1' \frac{\sqrt{H}}{D} \quad (1.5)$$

水轮机的静态特性曲线可用下述方法进行绘制。如果要绘制相应于 a_m （图 3）模型开度值的特性曲线，首先要确定与模型开度相应的水轮机实际开度 a 。根据公式

$$a = a_m \frac{DZ}{D_m Z_m} \quad (1.6)$$

式中， D_m —模型转轮直径；

Z 及 Z_m —分别为水轮机和模型的导水机构的导叶数。

然后作出一系列单位转速 n_{11}' ， n_{12}' ， n_{13}' 等等的等值线，并按式 (1.5) 对于每个 n_1' 值求出水轮机的实际转速。在这些线与 $a_m = \text{常数}$ 线的交点处求出模型的单位流量 Q_1' 及模型效率 η_m 值。以后，对于所研究的每一个 n_1' 值可按下式算出水轮机的力矩

$$M_t = \frac{30}{\pi} \gamma D^3 H \frac{Q_1'}{n_1'} \eta_t \quad (1.7)$$

式中, D 及 H 的单位为米; γ 的单位为牛/米³; Q_2 的单位为米³/秒; n_1 的单位为米^{1/2}, 转/分。

式(1.7)中水轮机的效率在第一次近似中可取等于模型效率 η_m , 但是对于更精确地确定水轮机的力矩, 利用下面的经验关系式是适宜的

$$\eta_t = 1 - (1 - \eta_m)^5 \sqrt{\frac{D_m}{D}} \quad (1.8)$$

对于调节机构的其他开度也用这种方法绘制静态特性曲线。

图4示出了混流式水轮机在不同导水机构开度 a_1, a_2, a_3 时典型的静态特性图。从图中可

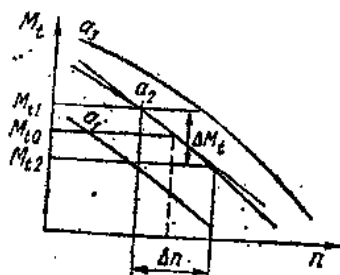


图4 水轮机的静态特性曲线

见随着水轮机转速的增大, 它的力矩减小。所有型式的水轮机都毫无例外地具有这种性质, 这个性质称为自调节效应。在数量上自调节效应可用水轮机自调节系数 e_t 表示, 对于给定的工况, 它取决于所研究的点引向等开度曲线切线的斜率。通常系数 e_t 通过相对量由下列关系式确定

$$e_t = \frac{dM_t}{dn} \frac{n_n}{M_{t,n}} \quad (1.9)$$

式中, $M_{t,n}$ 及 n_n —分别为水轮机的力矩和转速的额定(计算)值。

根据图4, 导数 dM_t/dn 永远具有负号, 即自调节系数为负值。应该指出, 通常在水轮机调节方面的技术文献中, 把与式(1.9)符号相反的量称为自调节系数。前面作出的自调节系数的定义是与水轮机调速系统试验国际规程[44]一致的。

下面来研究发电机及负荷的静态特性。在

一般形式下, 负荷要求的有功功率是电压 U 及电流频率 f 的函数

$$P = P(U, f) \quad (1.10)$$

如果假定在运行时发电机的电压自动地地保持不变, 这一点与机组运行的实际条件极为相近, 则

$$P = P_0 + P_f \quad (1.11)$$

式中, P_0 —额定频率 $f = 50$ 赫兹时发电机的有功功率;

P_f —由于频率或转速变化引起用户功率的变化。

将方程式(1.11)各项除以旋转角速度就可得到负荷力矩的表达式

$$M_g = M_{g,0} + M_{g,n} \quad (1.12)$$

式中, $M_{g,n}$ —与转速有关的负荷力矩变化。

$M_{g,n}$ 的数值完全取决于负荷的组成成分, 对于纯有功负荷(照明和加热装置等), $M_{g,n}$ 的大小与转速成反比。在这种情况下, 负荷静态特性的形状如图5a所示。

如果功率是电气传动所要求的, 那么在这种情况下, 静态特性可出现下述几种情况:

- a) 力矩与转速无关的传动, 例如金属加工设备(图5, a);
- б) 力矩与转速成正比的传动(图5, б);
- в) 力矩与转速的平方成正比的传动(泵、鼓风机传动等, 图5, в)。

由图5可见, 负荷同样也具有自调节作用的性质, 但是与水轮机不同, 负荷的自调节系数 e_g 可以是负的, 也可以是正的。与 e_t 相似, e_g 的大小可按下列式确定

$$e_g = \frac{dM_g}{dn} \frac{n_n}{M_{g,n}} \quad (1.13)$$

式中, $M_{g,n}$ —负荷力矩的额定值。

在文献中常常用按功率的负荷自调节系数 K_g 来代替按力矩的负荷自调节系数 e_g , K_g 与 e_g 有下列关系

$$K_g = e_g + 1 \quad (1.14)$$

表1给出了前面所研究的各种负荷形式的系数 e_t 及 K_g 值。

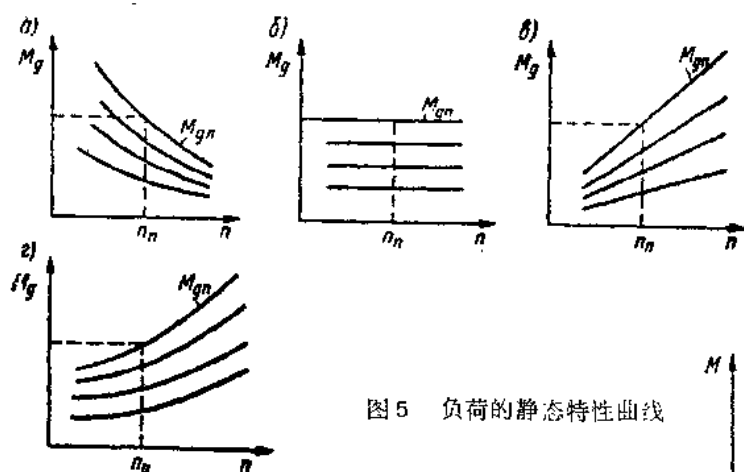


图5 负荷的静态特性曲线

表1 负荷自调节系数

负 荷	e_g	k_g
有功—电感	< -1	< 0
有功	-1	0
具有不变的力矩	0	1
具有与转速成正比的力矩	1	2
具有与转速的平方成正比的力矩	2	3

在电网实际条件下所遇到的是表中所列各种负荷形式的组合，例如功率为90万千瓦电网的试验表明 $e_g = 0.6$ [24]。

为了明确地提出关于水轮机自调节系数 e_t 及负荷自调节系数 e_g 的物理意义，来研究一下不作调节的水电机组，并说明在负荷力矩变化时 e_t 及 e_g 的大小对它的转速的影响。

图6所示，曲线 M_t 是额定调节机构开度时水轮机的静态特性，它的自调节系数等于 e_t 。如果在第一种情况下，负荷力矩取决于自调节系数 $e_g = -1$ 的直线1-1；在第二种情况下，取决于 $e_g = 0$ 的直线2-2；在第三种情况下，取决于 $e_g = 1$ 的直线3-3。这些直线与 M_t 曲线的交点 O 就决定着具有旋转角速度 n_n 的机组的稳定工况。

现在对三种情况的每一种都减少同一负荷力矩值 ΔM_g 。结果所有三条直线都向下移动一个 ΔM_g 值。图中新的静态特性用1'-1'，2'-2'和3'-3'来表示。这时，对第一种情况，

平衡工况移至 O_1 点，且转速为 n_1 ；对于第二种情况，移至具有转速 n_2 的 O_2 点；而对于第三种情况，平衡工况由具有转速 n_3 的 O_3 点决定。对于具有自调节系数 $e_g = 1$ 的负荷力矩，转速的增加为最小，而具有 $e_g = -1$ 的力矩，转速的增加最大。

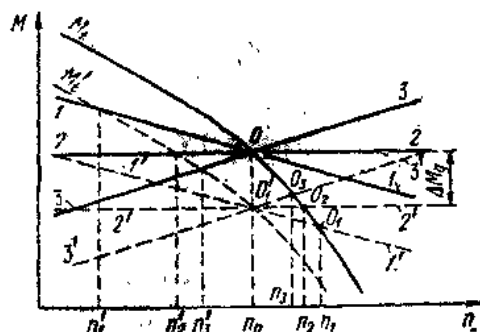


图6 水轮机的静态特性曲线

如果将水轮机力矩曲线改变 ΔM_t （虚线 M'_t ）来代替负荷力矩曲线则可得相似结果。当然在这种情况下机组转速相应地降低至 n'_1 ， n'_2 ， n'_3 。

因此，负荷自调节系数表示着负荷或水轮机力矩变化时不作调节的水电机组的转速变化程度，这个系数愈大，转速变化就愈小。

水轮机调节系数 e_t 对于不作调节的机组转速的影响，可以同样由图6来解释。为此，假想地将 M_t 曲线绕 O 点顺时针方向旋转，这就相应地使 e_t 加大。

由图可见，这时曲线 M_t 与 M_g 线的交点 O_1 ， O_2 ， O_3 向左移动，即与这些点相应的转速 n_1 ， n_2 ， n_3 被减小。如果我们用同样方法旋转曲线 M'_t ，则转速 n'_1 ， n'_2 ， n'_3 就增加。

这样一来，水轮机的自调节系数 e_t 也同样表示在负荷或水轮机力矩变化时不作调节的机组转速的变化程度。系数 e_t 的绝对值愈大，转速的变化愈小。

因为，被调节（被控制）系统是由水电机组和电网所组成的，那么就引出了被控制系统

总的自调节系数概念，它等于

$$e_n = e_g - e_r \quad (1.15)$$

系数 e_n 完全决定着被控制系统的静态特性。如果水电机组没有调速器，那么总自调节系数愈大，则在电网耗电变化时电网频率的波动就愈小。

最后，来研究一下调速器的静态特性。它表征水电机组稳定转速与调节机构接力器位置的关系。

再回到图 6，图上曲线 M ，相应于一定的调节机构接力器的位置 ψ_1 。该曲线与直线 1-1 的交点 O 确定着具有额定转速 n_n 的水电机组的稳定工况，正如已经指出的，在负荷力矩减小 ΔM_z 值时，稳定工况将由点 O_1 及转速 n_1 所确定。在这种情况下，转速的增加表现得特别大，并且是不允许的。调速器就应该自动地作用在调节机构上，将转速恢复至允许的范围。

如果借助于调速器将调节机构的开度减小到 ψ_2 (曲线 M'_1) 位置，那么新的稳定工况将对应于 O'_1 点，即额定转速 n_n 。因此，知道了 $\psi = f(M_z)$ 之后，就得到了机组转速 (直线 $O-O'_1$) 与调节机构接力器活塞位置的关系。当同一个稳定的水轮机转速对应有不同的接力器位置时，这样的特性称为调速器的无差特性，在图 7 中它以平行于水平轴的直线 1 示出。

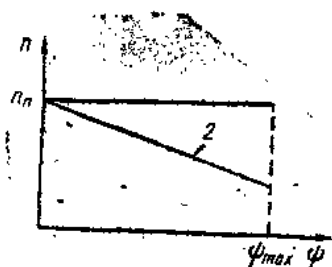


图 7 调速器的无差特性曲线 1 及有差特性曲线 2

但是，调速器是可以调整的，这样一来，发电机负荷变化后，机组转速不是精确地恢复到额定值，而是建立起在负荷减小时略高于额

定值，在负荷增加时略低于额定值的频率值。在这种情况下得到了如图 7 所示以倾斜直线 2 表示的调速器静态特性曲线，在原理上它不一定是直线，但通常接近于直线。

确定在所研究点处特性曲线斜率的数量

$$b_p = - \frac{dn}{d\psi} \frac{\psi_{max}}{n_n} \quad (1.16)$$

称作调速器的永态转差系数。

b_p 值可用相对量或者百分数表示，在调速器中可以整定在 $0 \sim 0.1$ 范围内。

4 水电机组在电网中的并联运行

在前一节中叙述的是关于在孤立带负荷时运行的一台水电机组。在现代条件下，这样的机组工况是极少的。通常，单个的机组和水电站在电网中联为一体化，电网也可以同样地彼此联为巨大的动力联合电网。这样一来，在电网中并联运行着大量的具有同步转速的机组，其同步转速由该电网电流频率确定。

正如已经指出的，基本的问题是保持电网频率与负荷无关。显然，如果整定调速器的永态转差系数为 0，这一点就很容易保证。但是在这种情况下，根据图 7，在两个或更多的并联运行机组无差整定时，虽然电网频率不变，仍会引起机组功率 (开度) 分配的不定性，也就是将功率无限制地由一台机组转移给另一台机组。当然，这在实际上是不允许的。

由此可得出结论：在水电机组并联运行时，如果没有专门的频率和有功率调节装置，在电网中只能有一台具有无差整定的调速器的机组运行。为了保证机组在电网中的并联运行，必须规定调速器的永态转差系数。

图 8 示出在电网中并联运行的两组机组的线性静态特性。一组以永态转差系数 b_{p1} 工作，另一组以 b_{p2} 工作。在一般情况下，所有调速器的永态转差系数可以是不同的，但是为了简单起见，这里只研究两个特性。

在稳定工况下，每一个调速器都根据自己的静态特性来保证转速与开度之间的关系，而且每台机组的转速都对应于电流频率所决定的

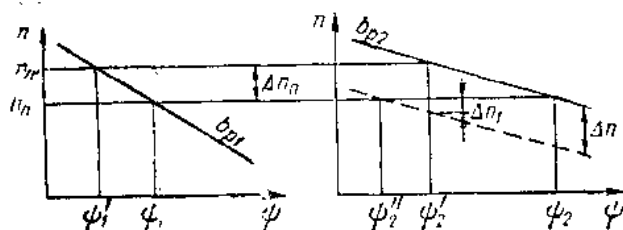


图8 机组并联运行

同步转速。因此,调节机构接力器位于 ψ_1 及 ψ_2 位置。当同步转速增加到 n_{n1} 时,接力器移至 ψ'_1 及 ψ'_2 的位置,而且

$$\Delta\psi_1 = \frac{\Delta n_n}{n_n b_{p1}} \psi_{1max} \quad 100\% \quad (1.17)$$

$$\Delta\psi_2 = \frac{\Delta n_n}{n_n b_{p2}} \psi_{2max} \quad 100\% \quad (1.18)$$

式中, $\Delta\psi_1 = \psi_1 - \psi'_1$ —第一组机组接力器位置的变化;

$\Delta\psi_2 = \psi_2 - \psi'_2$ —第二组接力器位置的变化;

$\Delta n_n = n_{n1} - n_{n2}$ —电网同步转速的变化。

对于更一般的情况,第 K 个机组接力器位置的变化将由下式确定

$$\Delta\psi_k = \frac{\Delta n_n}{n_n b_{pk}} \psi_{kmax} \quad 100\% \quad (1.19)$$

由图8可见,甚至在 b_{p1} 及 b_{p2} 相对较小的情况下(例如0.5~1.0%),同步转速及其相关的电网频率也可能超出允许的范围。为了不出现这个情况,每一个调速器应该有一能作用于它的静态特性的装置,以保持转速不变。在调速器中,这样的装置就是变速机构。借助于这个机构来改变与转速进行比较的标准值,这就导致调速器静态特性曲线的平行移动。

现在来研究一下需要将特性曲线(例如 b_{p2})移动一个什么样的量值才能使同步转速重新恢复至 n_n 值。为此目的,假定工作于该电网的所有机组的功率与它们的开度 ψ 成正比。这样

的假设是很粗糙的,但是在这种情况下,这个假设没有特别的意义,因为我们感兴趣的不是精确数量上的评价,而是问题的原理方面。

考虑到上述假设便可写出

$$\frac{\psi_{2max}}{b_{p2}} \Delta n_1 = \frac{\psi_{1max}}{b_{p1}} \Delta n_n$$

如果考虑到 $\Delta n_1 = \Delta n - \Delta n_n$,则

$$\frac{\psi_{2max}}{b_{p2}} (\Delta n - \Delta n_n) = \frac{\psi_{1max}}{b_{p1}} \Delta n_n$$

由此可得

$$\Delta n = \Delta n_n \frac{b_{p2}}{\psi_{2max}} \left(\frac{\psi_{1max}}{b_{p1}} + \frac{\psi_{2max}}{b_{p2}} \right)$$

$$\text{或 } \Delta n = \Delta n_n \left(1 + \frac{b_{p2}}{b_{p1}} \frac{\psi_{1max}}{\psi_{2max}} \right) \quad (1.20)$$

如果在电网中并联运行着 z 个不同静态特性的机组,那么其中一个调速器的特性曲线需要移动的量 Δn 可按下式确定

$$\Delta n = \Delta n_n \left(1 + \frac{b_p}{\psi_{max}} \sum_{k=1}^{K-z} \frac{\psi_{kmax}}{b_{pk}} \right) \quad (1.21)$$

式中, b_p 及 ψ_{max} 属于改变调速器特性的机组参数,而这一机组的 ψ_{max} 及 b_p 没有列入求和符号之内。

由式(1.20)及(1.21)可知,其特性曲线移动的机组功率愈大,且这一机组调速器的永态转差系数愈小,静态特性曲线必须移动的量就愈小,也就是需要改变的水轮机调节机构开度所需改变的量愈小。如果继续增加调速器静态特性曲线移动的机组数,则式(1.21)中 ψ_{max} 的增量与 $\sum$ 符号的减量相等,也就是在这种情况下 Δn 值将减小。在极限情况下,当所有调速器的静态特性曲线(具有相同的永态转差系数)都将移动时

$$\Delta n = 2\Delta n_n \quad (1.22)$$

这里需要注意,在式(1.22)中, Δn_n 值的本身与整定的永态转差系数 b_p 值有关。 b_p 愈小, Δn_n 亦愈小。

这样就得出结论,电网耗电变化时,在电

网中并联运行的所有机组的调速器静态特性曲线都将移动的情况下，调节机构开度的变化最小。

不久前，为了给变速机构以脉冲信号，以便用它来改变调速器的静态特性，在水电站设置了所谓的二次频率调节器，它本身是一个相当复杂的装置(13,16)。

在50年代末期，工程师Л.З. 阿里切尔曼对苏联电网提出了调节并联运行机组的比较合理的方法。他研制了专门的电磁校正器，这个校正器以附件的形式装在每个调速器上，而所有并联运行机组的调速器用有功功率校正装置(УКАМ)联结。文献〔1〕详细叙述了这个装置。这里仅仅指出，所提出的调节原理图

可使具有任意数量的水电站机组在调速器无差整定下进行工作，并能够接入УКАМ原理图中，实现所有机组的成组控制。以后便把类似的原理称为水电机组成组调节系统。

现在水电站应用的成组调节系统大多数已被改进。属于这种系统的有动力网设计研究所研制的功率成组调节装置(УГРМ)，苏联国营地区电站、输电网组织与合理化(ОРГРЭС)托拉斯研制的成组调速器(ГРС)系统。

应该指出，如果安装电液调速器便可很容易地实现最可靠的成组调节系统，因为在这种情况下不需要附加的附件，而有可能引入直流或交流电压形式的任意一种信号。

第二章 自动调节动力学基础

5 线性及非线性环节与系统

利用图 1 所示的自动调节系统的作用原理图。它是由许多满足一定作用的各种不同环节所组成的，而且每一环节的输入端又与前一环节的输出端相联系。以后，环节这一概念将理解为系统的一部分，它的输出量对输入量没有作用。

对于调节系统不断地作用着扰动作用 $z(t)$ ，以及控制作用 $c(t)$ （例如调速器整定的变化，来自成组调节系统的信号等），因此系统在所有时间内都工作于不稳定的状况。

调节动力学研究的基本问题是研究系统在扰动作用和控制作用下系统的运动。系统的运动称为调节过程，它在数学上用被调节量 X 随时间的变化，即函数 $X(t)$ 来表示。这就是说，为了研究在调节系统中发生的过程，必须首先编写该系统所包括的所有环节的微分方程式，并得出各个不同环节在数学上相互联系的方程式。结果得到描述自动调节系统动态过程的微分方程组，或一个总的高阶微分方程式

$$F_1\left(X, \frac{dX}{dt}, \dots, \frac{d^n X}{dt^n}\right) = F_2\left(z, \frac{dz}{dt}, \dots, \frac{d^m z}{dt^m}, C, \frac{dC}{dt}, \dots, \frac{d^k C}{dt^k}\right) \quad (2.1)$$

在一般形式下，方程式 (2.1) 可能包含有偏导数，或者它可能为积分—微分，或者差分形式。在给定的作用 $z(t)$ 及 $C(t)$ 之下，调节过程决定于方程式 (2.1) 的一般解 $X = X(t)$ 。

自动调节系统某些环节的方程式可能含有非线性函数。有时这些函数以曲线给出，例如水轮机的静态特性（图 4）。一般来说，这些方程式的解，只可能是曲线的或数字上的解，当然，得到一般的结果在很大程度上是困难

的。因此在自动调节原理中，非线性方程式经常进行线性化，这种情况下，系统称为线性系统。

线性化的过程是，由全变量的非线性方程式过渡到变量与稳态值有微小偏差的线性方程式。例如图 4 所示的水轮机力矩 M_t 与转速 n 的关系，就是非线性的。但是如果取力矩与其稳定值 M_{t1} 的微小偏差 $\Delta M_t = M_{t1} - M_{t2}$ ，那么在这个范围内可以把特性曲线 $M_t = f(n)$ 近似地认为是线性的。作为这种线性化的基础存在着一个假设，即变量在调节过程中是这样变化的，就是使得它们与稳定值的偏差在所有时间内都是足够小的。这种假设的正确性是完全合乎规律的，因为自动系统工作的本身概念就要求被调节量与其稳定值有微小偏差。

如果 X_{BX} 及 X_{BX} 是线性系统或环节的输入量和输出量，则系统或环节的动态过程将要用下列微分方程式来描述。

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n X_{BX}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} X_{BX}}{dt^{n-1}} + \dots + \\ + a_{n-1} \frac{dX_{BX}}{dt} + a_n X_{BX} = b_0 \frac{d^m X_{BX}}{dt^m} + \\ + b_1 \frac{d^{m-1} X_{BX}}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dX_{BX}}{dt} + b_m X_{BX} \quad (2.2) \end{aligned}$$

式中， a_i 及 b_i —— 系数。

以后，将利用算子符号型式书写，用下列符号表示

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &= p, \\ \frac{dX}{dt} &= pX, \quad \frac{X d^2}{dt^2} = p^2 X \text{ 等等,} \end{aligned}$$

$$\int X dt = \frac{X}{p}, \quad \iint X dt^2 = \frac{X}{p^2} \text{ 等等.}$$

这时，方程式 (2.2) 可以改写成下列形式

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) X_{\text{BHX}} = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) X_{\text{BX}} \quad (2.3)$$

用线性微分方程式来描述其动态过程的自动系统属于线性系统。这时系统可以包含有下述环节：1) 用具有不变参数和可变参数的微分方程式来描述的环节；

2) 具有以偏微分方程式描述的分布参数的系统的环节，系统含有很长的必须考虑波动过程的管路；

3) 在作用的传递中具有滞后环节。

系统只要包含一个非线性环节，也就是，只要任何一个（或一些）环节的特性对所得结果的精度没有很大损害，就不能进行线性化时，这样的系统称为非线性系统。

在本章中只研究线性环节和系统，将自动调节系统各单个环节的方程式用线性形式来表示，将容易进行调节动力学分析。这时需始终注意到，利用解线性化方程式所得的结果，在与平衡位置偏差很大时，将引起一定的误差。虽然如此，线性调节理论还是作为计算调节过程的所有工程方法的基础。

在下一章中研究水电机组自动调节的具体原理图时，将特别注意单个环节的某些重要的非线性对闭环调节系统工作品质指标的影响

6 稳定性和过渡过程品质

线性自动调节系统的动力学是用方程式 (2.3) 来描述的，这个方程式可以表示为下列形式

$$L(p) X_{\text{BHX}} = S(p) X_{\text{BX}}, \quad (2.4)$$

式中， $L(p)$ 及 $S(p)$ ——方程式 (2.3) 左部和右部的算子多项式。

方程式 (2.4) 的解，由齐次方程式 $L(p) X_{\text{BHX}} = 0$ 的一般解 $X_{\text{BHX1}}(t)$ 及与方程式右部相对应的特解 $X_{\text{BHX2}}(t)$ 所组成，

$$X_{\text{BHX}} = X_{\text{BHX1}}(t) + X_{\text{BHX2}}(t) \quad (2.5)$$

根据 (2.3)，齐次方程式

$$L(p) X_{\text{BHX}} = (a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots +$$

$$+ a_{n-1} p + a_n) X_{\text{BHX}} = 0 \quad (2.6)$$

对应着特征方程式

$$L(z) = a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n = 0 \quad (2.7)$$

如果在方程式 (2.7) 中求出根 $z_1, z_2, \dots, z_n$ ，则对于没有重根、零根，且所有的根都不同的情况下，齐次方程的一般解将具有下列形式

$$X_{\text{BHX1}}(t) = C_1 e^{z_1 t} + C_2 e^{z_2 t} + \dots + C_n e^{z_n t} \quad (2.8)$$

式中， $C_1, C_2, \dots, C_n$ ——按照给定的初始条件确定的积分常数。

$X_{\text{BHX1}}(t)$ 的表达式对应着过渡过程，或者系统的自由运动，而特解 $X_{\text{BHX2}}(t)$ 对应着稳定过程，或者是强迫运动。由表达式 (2.8) 可以看出，即使一个根 $z > 0$ ，那么过渡过程将是发散的，即 $t \rightarrow \infty$ 时，值 $X_{\text{BHX1}}(t) \rightarrow \infty$ 。在这种情况下，系统将是不能工作的，因为它不能回到被特解 $X_{\text{BHX2}}(t)$ 所决定的稳定状态。这样的系统称为不稳定系统。

来研究以下，在什么条件之下线性系统是稳定的。在一般情况下，根 $z_1, z_2, \dots, z_n$ 之中可以是实根，也可以是共轭复根。假定方程式 (2.7) 有 k 对共轭复根 $\alpha_j \pm \beta_j i$ ，其中 $j = 1, 2, \dots, k$ ，和 $n - 2k$ 个实根 s_i ，其中 $i = 2k + 1 \dots n$ 。这时方程式 (2.7) 的一般解写成下列形式

$$X_{\text{BHX1}} = \sum_{j=1}^k e^{\alpha_j t} (A_j \cos \beta_j t + B_j \sin \beta_j t) + \sum_{i=2k+1}^n A_i e^{s_i t} \quad (2.9)$$

式中， A_j, B_j, A_i ——积分常数。

因为我们是研究系统的自振，因此如果在 $t \rightarrow \infty$ 时， $X_{\text{BHX1}} \rightarrow 0$ ，系统将是稳定的。

根据方程式 (2.9)，只有在 $t \rightarrow \infty$ 时右部中两个和的所有分量均趋于 0 时，才有可能。如果随着时间的增大，即使一个分量增大，那么 X_{BHX1} 之值将无限制地增大，也就是，过程将是发散的，而系统则是不稳定的。