

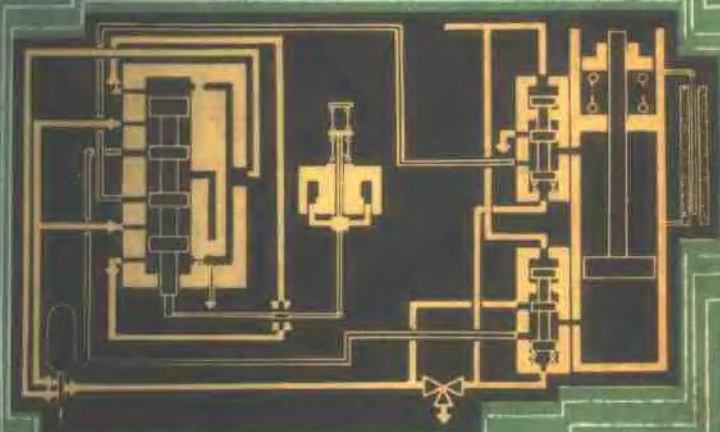
768710

5344

2328255

汽轮机电液调节

上海汽轮机厂



水利电力出版社

6

汽轮机电液调节

上海汽轮机厂

水利电力出版社

汽轮机电液调节

上海汽轮机厂

*

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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 23.5印张 533千字 1插图

1985年2月第一版 1985年2月北京第一次印刷

印数0001—4400册 定价4.30元

书号 15143·5580

内 容 提 要

本书系统地总结了我国汽轮机电液调节系统的发展过程，深入浅出地阐明了大功率再热式汽轮机电液调节系统的设计要求和设计方法，使用自动控制原理对电液调节系统进行了细致的分析，详细地介绍了电液调节系统中采用的各种元部件以及电液调节装置的实例，对于供油系统和抗燃油等也作了论述。这种具有较强的工程实用性的设计计算和实践经验，对于从事本专业的科技人员颇有裨益。

本书还广泛收集了国内外有关汽轮机电液调节系统的资料，较详细地介绍了具有发展前途的汽轮机数字电液调节系统(DEH)，以供查阅和设计参考。

本书可供动力制造、火力发电厂以及化工、石油等部门从事汽轮机自动控制工作的技术人员学习参考，也可作为大专院校轮机专业的教学参考书。

前 言

随着我国工农业生产和科学技术的迅速发展，动力工业中汽轮机组的单机功率不断增长，相应的自动控制要求也愈来愈高。许多从事动力工业的技术人员迫切需要了解这方面的新技术。作为汽轮机自动调节这一专业来说，过去虽曾出版了不少这方面的书籍，但是内容一般都偏于汽轮机的液压调节，对于大功率汽轮机调节的论述和分析尚少，对电液调节系统的介绍更为缺乏。为弥补这一空白，作者特编写此书，以作引玉之尝试。

由于汽轮机电液调节的出现，不仅在设计制造方面需要掌握热工对象、液压和电子技术等方面的知识，而且对火力发电厂的应用也带来了新的情况，打破了以往汽轮机调节仅属于汽轮机检修人员的职责范围，而需要热工检修人员来参与维护检修。同时，对汽轮机运行人员来说，以往只需熟悉液压调节系统，现在又要了解电子方面的知识。更重要的是，由通常分别控制的汽轮机调节提高到机炉电协调控制的高级综合水平。因此，本书为照顾到上述情况，并为叙述得更清楚，对电液调节系统进行了由浅入深的分析。在第一章中，从汽轮机调节的基本原理开始，概括地介绍了一般调节系统的静态和动态要求，以及简要地介绍了一些主要的动态分析方法。然后，在第二章中，从电力系统、锅炉、汽轮机三个方面对中间再热式汽轮机的调节提出了要求，阐明了中间再热式汽轮机调节的特点，以及设计这类调节系统时应考虑的一系列问题。第三章是在前两章的基础上，对功率-频率电液调节系统进行了深入的动态分析，以利读者从本质上去掌握它。接着，第四、五章就从具体的电液调节装置及其元、部件以及供油系统，进行较详细的介绍。最后，在第六章中，对电液调节系统在国外的发展——数字式电液调节系统，以及各种类型汽轮机应用电液调节系统的情况，包括目前我国进口的各种汽轮机控制系统作了详细介绍，以供读者参考。

此外，在编写过程中也不想对读者提出 现时在自动调节理论中应用的全部术语和内容，而主要着眼于解决问题的实际需要，这是不同于一般教科书的特点。这样处理的目的是企图使读者始终以解决实际问题为中心，来掌握各种分析方法。

本书可作为汽轮机专业和其他动力机械、能源等专业高年级学生，以及有关专业工程技术人员的参考书籍。

本书由我厂包霖洋同志执笔编写。

本书的主审工作是在南京工学院钱钟韩院长协助下，由曹祖庆同志、陈来九同志、宋谊同志进行审核。哈尔滨工业大学徐基豫同志也对原稿进行了仔细的审阅，并提出了很多宝贵意见，在此一并深表感谢。另外，我厂伍能总工程师和朱锡生副总工程师对本书编写工作也给予了支持和关心。

由于编者水平有限，错误在所难免，敬希读者指正。

上海汽轮机厂
一九八四年四月

目 录

前 言

第一章 汽轮机调节的基本原理	1
第一节 汽轮机调节系统的功能	1
第二节 如何实现汽轮机的调节系统	4
第三节 调节系统的静态特性	5
一、静态特性曲线(5) 二、转速不等率(6) 三、迟缓率(7) 四、同步器(8) 五、对调节系统静态特性的要求(9) 六、调节系统静态特性计算举例(10)	
第四节 调节系统的动态特性	12
一、动态特性研究的必要性(12) 二、对调节系统动态特性的要求(15) 三、影响动态特性的一些主要因素(16)	
第五节 调节系统的动态分析	17
一、调节系统及元件的微分方程列写举例(18) 二、方框图与信号流图(24) 三、由微分方程直接求解,来分析系统的过渡过程及稳定性(33) 四、对数频率特性(41)	
第六节 状态空间分析法	53
一、引言(53) 二、基本概念(54) 三、汽轮机调节系统的状态空间方程(57) 四、状态变量的置换(59)	
第二章 中间再热汽轮机的调节和控制	61
第一节 电力系统对大功率汽轮机的要求	64
一、电力系统控制结构(64) 二、负荷变化的频谱密度(68) 三、可靠性(69) 四、原动机参与改善电力系统的稳定性(70)	
第二节 中间再热汽轮机调节的特点	76
一、提高中间再热汽轮机组的负荷适应性(76) 二、改善机组动态超速性能及高、中压调节汽阀的匹配关系(83) 三、高压调节汽阀的配汽方式(90) 四、电液调节系统(96)	
第三节 单元制汽轮机锅炉的控制和运行方式	96
一、锅炉跟随的控制方式(97) 二、汽轮机跟随的控制方式(常压运行)(99) 三、汽轮机跟随的控制方式(滑压运行)(99) 四、机炉协调控制方式(100)	
第四节 承受冲击负荷的汽轮机调节系统	101
一、冲击负荷对系统频率、电压以及功率振荡的影响(101) 二、冲击负荷功率跟纵调节装置(103) 三、有待研究的问题(104) 四、冲击负荷的预测控制方式(105)	
第三章 功率-频率电液调节系统	110

第一节	功率-频率电液调节系统的基本原理	110
	一、为什么要采用功率-频率调节系统(110) 二、功率-频率电液调节系统的功能(111)	
第二节	调节对象的传递函数及PID调节器的频率特性	122
	一、汽轮机蒸汽功率的传递函数(122) 二、汽轮发电机组的传递函数(124) 三、电网的传递函数(128) 四、各种校正元件的作用(131)	
第三节	并网运行时谐波扰动下的调节效率计算	136
	一、非再热机组的调节效率(137) 二、采用转速调节的中间再热机组的调节效率(138) 三、具有功频调节系统的中间再热机组的调节效率(139)	
第四节	功频调节系统在各种工况下的稳定性分析	141
	一、启动工况时,转速调节回路的对数频率特性(142) 二、带负荷运行工况时,功率调节回路的对数频率特性(144) 三、汽轮机参与调频时,功率和转速调节回路的对数频率特性(147) 四、汽轮机调压运行时的对数频率特性(152) 五、甩负荷后极限转速控制的对数频率特性(153)	
第五节	应用模拟计算机进行瞬态分析	154
	一、模拟计算机简介(155) 二、功率-频率电液调节系统的模拟计算(166)	
第六节	复合控制	192
第七节	应用线性最佳控制理论来设计汽轮机调节系统	198
	一、采用调节汽阀最佳快速控制(198) 二、利用线性最佳控制理论设计汽轮机调节系统(201)	
第四章	功率-频率电调装置	203
第一节	功频电调装置中各主要部件的原理	203
	一、转速敏感元件——磁阻发送器(203) 二、频率变送器(205) 三、功率变送器(212) 四、转速给定和功率给定(223) 五、速率控制器(223) 六、运算放大器的一般概念(227) 七、集成元件的运算放大器(233) 八、磁性运算放大器(MOA)(243) 九、1500Hz的方波电源(253) 十、比例-积分-微分调节器(PID)(255) 十一、压力变送器及压力给定(258) 十二、电调装置的保护(260) 十三、直流稳压电源(260)	
第二节	电调装置的实例	262
	一、用于某热电厂125MW汽轮机上的功频电液调节系统(263) 二、QDT-1型汽轮机电液调节装置(272) 三、用于300MW汽轮机的功频调节装置(275) 四、其它(277)	
第三节	电液调节装置的起动、停机和事故处理	280
	一、电调装置的起动与停机(280) 二、电调运行时,做危急遮断器超速试验(282) 三、带负荷运行中,液调切换到电调(282) 四、电调运行时的事故处理(282)	
第四节	电液调节装置的维护及试验	283
	一、电液调节装置的维护(283) 二、电液调节装置的常规试验(284) 三、电调装置自闭环试验(284) 四、电调装置的动态模拟试验(284)	
第五章	供油系统及电液转换器	286

第一节 采用透平油的供油系统	286
一、离心式主油泵及注油器的供油系统(286) 二、对油质的要求及防止油质劣化(288) 三、大型机组油系统防火措施(289) 四、电液调节对供油系统的一些特殊要求(291)	
第二节 采用抗燃油的供油系统	295
一、抗燃油的发展简况(295) 二、抗燃油的种类与性能(297) 三、有关抗燃油供油系统设计的若干问题(302)	
第三节 电液转换器(电液伺服阀)	310
一、概述(310) 二、电液转换器的基本原理和类型(310) 三、其它类型电液转换器的实例(315)	
第六章 汽轮机电液调节系统的应用和发展	318
第一节 数字式电液调节系统	318
一、概述(318) 二、电子控制器(321)	
第二节 意大利320MW汽轮机控制系统	326
一、概述(326) 二、协调控制系统(326) 三、汽轮机跟随锅炉, 机组输出功率可以调节(332) 四、汽轮机跟随锅炉, 机组输出功率不加调节(333) 五、锅炉跟踪汽轮机, 机组输出功率不加调节(333) 六、机炉分散控制方式(333)	
第三节 法国300MW汽轮机控制系统	334
一、概述(334) 二、Turbotrol4调节装置(334)	
第四节 日本250MW及125MW机组的控制系统	346
一、概述(346) 二、250MW机组自动起动系统(346) 三、125MW机组自动起动系统(348)	
第五节 捷克斯洛伐克110MW汽轮机的电液调节系统	352
一、概述(352) 二、TRV-03调节器的工作原理(352)	
第六节 核电站汽轮机的电液调节系统	354
一、概述(354) 二、法国Alsthom公司的核电站汽轮机调节系统(354) 三、日本福岛核电站4号机784MW汽轮机的电液调节系统(358)	
第七节 工业用汽轮机的电液调节系统	359
一、热电站用供热汽轮机的电液调节系统(359) 二、驱动给水泵的汽轮机用电液调节系统(362)	
编后语	366
主要参考文献	367

第一章 汽轮机调节的基本原理

第一节 汽轮机调节系统的功能

汽轮机是一种将热能转换成动能的旋转机械，当它驱动交流同步发电机时就进一步将动能转换成电能。冲动式汽轮机的通流部分主要由喷嘴（隔板静叶）和动叶组合的级所构成。来自锅炉的高压蒸汽经主汽门和调节汽阀流入汽轮机，在第一排喷嘴中膨胀，降低了压力和温度后换得了动能，然后在第一排动叶中因方向的改变，将大部分动能经动叶传递给汽轮机转子。这个膨胀过程将在以后各级中重复进行（在反动式汽轮机中，除了在动叶中也有一定膨胀外，其过程基本上与上述过程相似），最后将蒸汽排入凝汽器。由各级所获得的力矩的总和，即作为汽轮机的主动转矩，用它来驱动发电机。

汽轮机的功率可由位于第一级喷嘴前的调节汽阀来控制。假定调节汽阀前蒸汽参数为常数，排汽背压也维持不变，即每公斤蒸汽所作的功——有效焓降近似不变，则汽轮机功率大致与蒸汽流量成正比，这可用图 1-1 表示。一台 300~600MW 的汽轮发电机组，其空载流量约为额定流量的 3~5%。

为了安全起见，在调节汽阀前还设有自动主汽门，正常运行时它是全开的。从经济观点看，希望自动主汽门和调节汽阀所引起的压降应尽量地小，一般各约 2% P_0 (P_0 为新汽压力)。一台凝汽式汽轮机，当用一只调节汽阀控制（节流调节）时，通过汽轮机的压降可与其流过的流量成正比关系，这就可绘出喷嘴前的压力与功率的曲线（见图 1-2）。从图中可知，ab 即为管道及主汽门的压降，可认为是与流量成平方关系的，cd 为在汽轮机中的压降，而曲线 qe 即为流量与功率曲线。

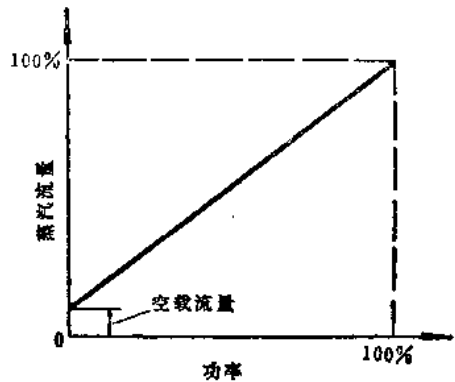


图 1-1 汽轮机流量与功率的曲线

这样，在任何负荷时调节汽阀的通流面积均可按下述计算法求得。例如，在 d 点的负荷时，蒸汽流量为 $de = D \text{ kg/h}$ ，调节汽阀前后压力相应为 $P_1 = bd$ 绝对压力及 $P_2 = cd$ 绝对压力。流过收缩喷嘴的单位面积流量，在 P_2/P_1 大于临界压比时，可按下式计算：

$$D^* = \sqrt{\frac{2 \text{ kg}}{k-1} \times \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \text{ kg/(h} \cdot \text{cm}^2) \quad (1-1)$$

式中 k —— 绝热指数；

v_1 —— 阀前蒸汽比容。

当 P_2/P_1 小于或等于临界压比时，则流量取决于阀前蒸汽参数。当新蒸汽压力保持不

变时,流量也就保持为一常数。于是调节汽阀的通流面积为 $F=D/D^*$, F 曲线示于图1-2中。

实际上,常用的调节汽阀均带有扩压管,以回收压力能,所以公式(1-1)中的前后压比所对应的最大流量压比 ε_0 可按式计算

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + (1 - \varepsilon_c) \sqrt{1 - (1/f_d)^2} \quad (1-1')$$

式中 ε_c ——临界压比;

f_d ——扩压管(缩放喷嘴)出口和喉部面积比。

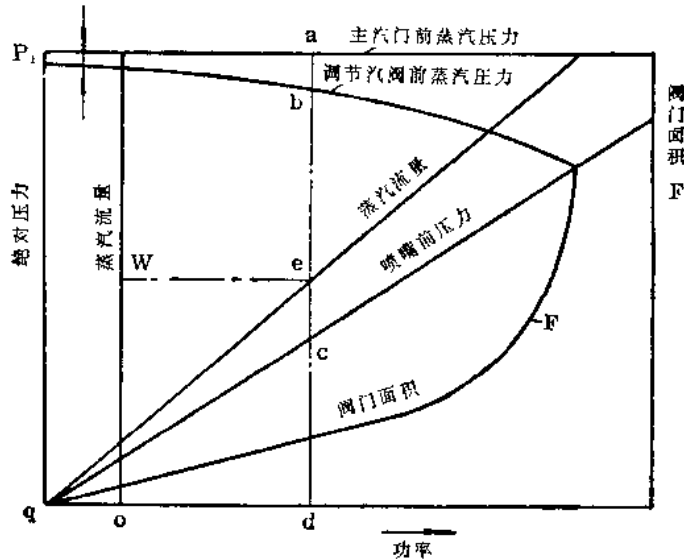


图 1-2 压力-流量特性

这种采用单阀控制功率的方式称为节流调节。由图可知,这种节流调节在部分负荷时,由于阀门未开足,使蒸汽受到较大的节流,压力损失如图中bc段所示,随负荷降低而增大,所以热经济性降低较多。此外,从调节汽阀开启面积看到,在阀门开启的前半部内,流量和开启面积(或阀门升程)基本成正比关系,而在汽阀接近开足的范围蒸汽流量增长很缓慢。这就使调节汽阀的流量特性呈现出非线性,它会影响到调节系统静态特性的线性度和局部不等率。

如果采用多阀控制,那就是另一种常用的调节方式,称为喷嘴调节。它一般采用四个调节汽阀,各阀分别控制一组喷嘴,通过这些阀门的依次开启或关闭来调节进入汽轮机的流量。这样,在任一工况下,只有一个阀门处于部分开启状态,而其余各个阀门则处于全开或全关位置。所以,在进入汽轮机的总流量中,只有经过部分开启阀门的那部分蒸汽受到节流,从而大大地改善了机组在低负荷下运行的经济性,如图1-3所示。此外,为了改善阀门流量特性的非线性,也可改变各阀开启时衔接的重叠度,或采用凸轮传动配汽机构,适当修正凸轮型线来改善非线性程度。

现在进一步分析作用于汽轮发电机组转子上的蒸汽转矩和发电机转矩的关系。前者是主动转矩,后者是从动转矩,根据牛顿第二定律,可列出如下方程

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

式中 J —— 汽轮发电机组转子的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$);

ω —— 转子的旋转角速度 (s^{-1});

M_T —— 汽轮机产生的蒸汽转矩 ($\text{kgf} \cdot \text{m}$);

M_G —— 发电机电磁转矩 ($\text{kgf} \cdot \text{m}$)。

当 $M_T = M_G$ 时, $d\omega/dt = 0$, 所以 $\omega = \text{常数}$, 即主动转矩等于从动转矩(阻力转矩)时, 则汽轮发电机组以一稳定的转速(恒速)运转。但两个转矩平衡的情况只是暂时的,

当外界负荷改变时 M_G 也变化, 同时 M_T 也会受一些参数的影响而变化。

蒸汽转矩 M_T 可用下列等式表达:

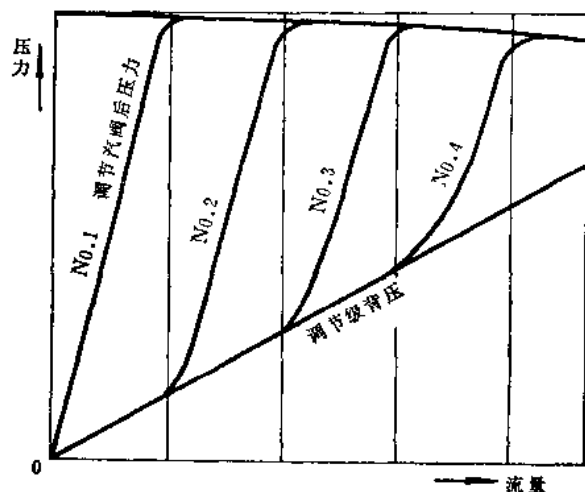


图 1-3 喷嘴调节压力-流量特性

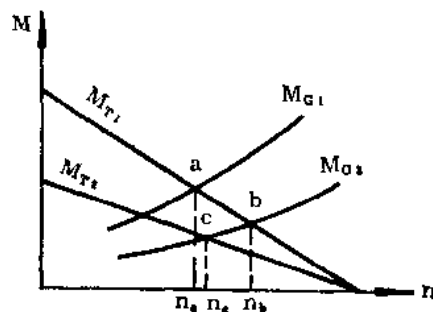


图 1-4 汽轮机和发电机的转矩特性

$$M_T = \frac{102}{860 \times \frac{2\pi}{60}} \times \frac{DH_0 \eta_{oe}}{n} = 1.13 \frac{DH_0 \eta_{oe}}{n} \quad (\text{kgf} \cdot \text{m}) \quad (1-3)$$

式中 D —— 进入汽轮机的蒸汽流量 (kg/h);

H_0 —— 绝热焓降 (kcal/kg);

η_{oe} —— 汽轮机相对效率;

n —— 汽轮机转速 (r/min)。

前面已讲过, 实际焓降(有效焓降) $H_0 \eta_{oe}$ 在过渡过程中基本上保持不变。求出蒸汽转矩 M_T 对蒸汽流量 D 及转速的偏导数, 并经改写后得出蒸汽转矩的相对偏差量为

$$\frac{\Delta M_T}{M_{T_0}} = \frac{\Delta D}{D_0} - \frac{D}{D_0} \cdot \frac{\Delta n}{n_0} \quad (1-4)$$

式中 $M_{T_0} = \frac{1.13 D_0 H_0 \eta_{oe}}{n_0}$ —— 额定蒸汽转矩 ($\text{kgf} \cdot \text{m}$);

D_0 —— 额定蒸汽流量 (kg/h);

n_0 —— 额定转速 (r/min)。

参数前符号“ Δ ”表示该参量与其额定值的偏差。

图1-4表示了蒸汽转矩和转速的关系曲线, 称为汽轮机的内特性。曲线 M_{T1} 及 M_{T2} 对

对于两个不同的进汽量， M_{T1} 的进汽量大于 M_{T2} 的进汽量。

发电机转矩一般与转速有关，以 $M_G = f(n)$ 表示，称为发电机特性。它主要取决于外界负载的特性。例如，当发电机转速（电网频率）改变时，电网中电动机的转速也随之改变，对应于拖动水泵或风机的电动机，则其阻力转矩与转速的平方成正比；对应于带动金属切削机床的电动机，则阻力转矩与转速的一次方成正比；对于白炽灯、电阻丝等负载，则阻力转矩与转速无关。这样，就可用下式表示在各种负载下的发电机阻力转矩

$$M_G = K_1 + K_2 n + K_3 n^2 \quad (1-5)$$

式中 K_1 、 K_2 、 K_3 为比例系数，阻力转矩 M_G 随转速 n 增加而增加，其相应的曲线

M_{G1} 、 M_{G2} 表示在图 1-4 中，其增量可用 $\Delta M_G = \frac{\partial M_G}{\partial n} \Delta n$ 表示。

由图 1-4 可知，曲线 M_{T1} 和 M_{G1} 的交点 a 即为汽轮机带动发电机运转，在转速 n_a 时的一个稳定工况。这时，如果负载有变化，发电机转矩特性改变到 M_{G2} ，而汽轮机的进汽量保持不变，那末新的平衡点为 b，即汽轮发电机组以 n_b 转速稳定运转。这说明，在这种情况下，从理论上讲汽轮发电机组即使没有自动调节系统，它也可以从一个稳定工况过渡到另一个稳定工况。这可从式 (1-4) 看出，汽轮机转矩随转速增加而减少，发电机转矩却随转速增加而增加，当两个增量的代数和为零时，即达到平衡状态。这种能力，称为自平衡或自调整能力。但是，这种情况事实上是不允许的，因为对带交流发电机的汽轮机来说，这种自平衡能力很小，因此汽轮机转速变化很大，不仅会使机组发出的电能的频率和电压不能满足用户要求，而且就汽轮机组的强度和效率来看也是不许可的。

为了减少转速的波动，当外界负荷变化时，就应随之改变汽轮机的进汽量。如继续上述过程，将由调节系统来改变汽轮机的进汽量，即从曲线 M_{T1} 减少到曲线 M_{T2} ，则曲线 M_{T2} 和 M_{G2} 的交点 c 即为新的平衡工况，此时的工作转速 n_c 与初始的转速 n_a 相差不多，这就为机组设备所允许。上述过程说明了自动调节系统的功能，即用自动改变进汽量的手段使在转速变化不大的条件下达到新的平衡，以适应外界负荷或蒸汽状态的变化。

第二节 如何实现汽轮机的调节系统

由上节知道，调节系统的任务就是改变蒸汽转矩。从式 (1-3) 可知，改变流量 D 或焓降 $H_0 \eta_{01}$ ，或两者同时改变，均可使蒸汽转矩随之变化。这些方法实际上就是通过喷嘴调节、节流调节和滑压调节等手段来实现的。但是，不论用何种调节方法来改变蒸汽转矩，最终都需要用调节系统的执行机构（油动机）来控制调节汽阀。那末，接着产生的问题就是用什么信号来控制油动机呢？图 1-5 表示出了凝汽式汽轮机的调节系统原理图及方框图。

当外界负荷变动使汽轮机转速也相应变动时，例如负荷减少，则转速上升 Δn ，离心式调速器飞锤的离心力也相应增加，克服了弹簧的约束力，使滑环产生一个向上的位移 Δx ，再经过杠杆的传递带动错油门上移 Δs ，这时从主油泵来的动力油就进入油动机活塞的上部，而活塞下部的油则排向回油管道。活塞在其上下油压差的作用下向下移动，从而

关小调节汽阀，使汽轮机的蒸汽功率减少而与外界负荷相平衡。与此同时，由于杠杆的反馈将错油门下移，使错油门回到套筒的中间位置。这样，当进出油动机活塞上下的窗口均被错油门上的凸肩所遮盖时，油动机活塞和调节汽阀就停留在一个新的稳定位置，整个机组就在升高了 Δn 的新转速下稳定运转。这就是常用的转速调节的基本原理。

现将组成调节系统的各部件以方框形式顺序排列，再按各部件的输入量和输出量的关系用直线连接并示以箭头方向，如图1-5所示。这种方框图是分析自动调节过程时经常采用的，因为它可以清晰地表明系统中各元件的功能和信号传递情况，并能以数学形式将各部件的特性表达出来，进行分析研究，所以是很有用的方法。

以上讲述了汽轮机调节的功能和方法。但是，对于一个现成的调节系统，我们将如何来评价它的性能呢？对于一个需要新设计的调节系统又将如何着手呢？应该提出哪些指标呢？为解决这些问题，就需要运用自动调节理论对具体的汽轮机调节对象进行分析研究，一般分为调节静力学和调节动力学两部分。调节静力学研究调节系统在各平衡工况下的工作，调节动力学则研究调节系统在过渡过程中的工作。下面介绍这方面的基本概念。

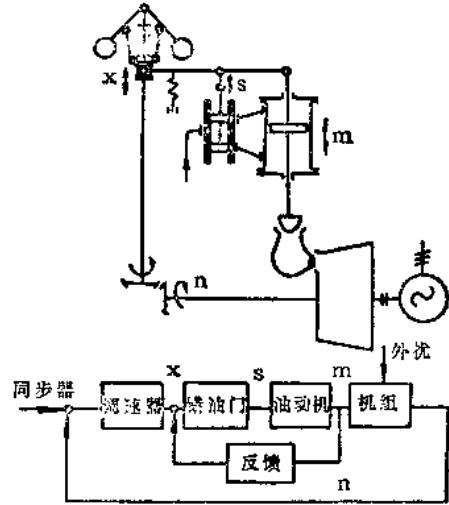


图 1-5 凝汽式汽轮机调节系统原理图及方框图

第三节 调节系统的静态特性

调节系统的主要功能是调节汽轮机的功率，使与外界负荷相适应。描述汽轮机平衡工况下的工作特性，即汽轮机在同步器的不同位置时，稳定工况下功率与转速的关系，通常称为调节系统的静态特性。对调节系统的静态特性应该有一定的要求。

一、静态特性曲线

并列在电网中运行的机组，其转速为电网的频率所决定，不可能由一台机组自由改变；即使是某一孤立运行的机组，也因用户对供电质量的要求而不允许转速有较大的变动。所以，调节系统的静态特性，一般是通过分部试验或计算而间接求得的。

采用四象限图可简明地描述调节系统的静态特性，如图1-6所示。该图明显地表示了汽轮机转速 n 、调速器滑环行程 x 、油动机行程 m 或调节汽阀行程 h 以及汽轮机功率 N 之间的关系。对照图1-5的调节系统，图1-6中的第二象限为调速器特性，它表示了转速与调速器滑环行程之间的关系；第三象限为传动放大机构特性，表示了调速器滑环行程与油动机（或调节汽阀）行程之间的关系；第四象限为配汽机构特性，它表示了汽轮机功率与油动机（或调节汽阀）行程间的关系，一般是按额定参数条件进行计算或通过试验求得。曲线的形状由调节汽阀型线及配汽传动机构的传动比及调节方式等因素决定。根据这三条曲

线bb、cc、dd，如图所示按投影原理作图，可在第一象限内给出汽轮机功率与转速的关系曲线aa，这条曲线就称为调节系统的静态特性曲线。

由此可见，调节系统的静态特性取决于组成系统的各元件的特性，即调速器特性曲线、调速器到油动机的传动放大机构特性曲线，以及调节汽阀升程与蒸汽流量、汽轮机功率之间的特性曲线，而这些特性在设计调节系统时是可以通过计算来确定的，并使其最终的静态特性满足要求。如果不满足，就须修改某些元件的特性，以期获得所需要的静态特性。对于现有汽轮机组的调节系统，如要测取其静态特性，也是先测取各部件的特性，然后再间接绘制而成，所以在试验中即可判定各部件的特性是否符合要求。由于调节系统的静态特性对汽轮机的运行（不论是单机运行或并网运行）有着重要的意义，因此对它的曲线形状及相应的指标有着严格的要求。

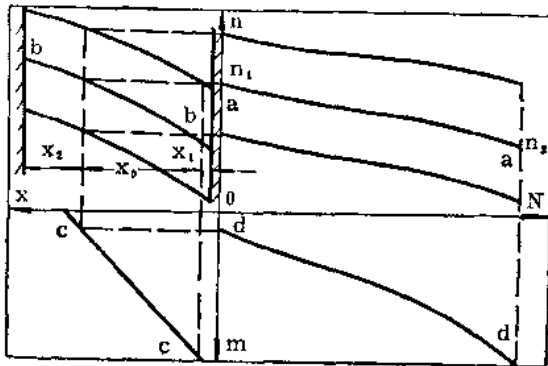


图 1-6 调节系统静态特性

调速器不等率 $\delta_T = \delta + \zeta_1 + \zeta_2 = (1.5 \sim 1.8)\delta$;
 ζ_1 —开阀门时调速器相对行程余量;
 ζ_2 —关阀门时调速器相对行程余量

二、转速不等率

(一) 转速不等率的定义

当汽轮机单机运行，在同一同步器位置下，从空负荷变到全负荷时，转速相应从 n_1 变到 n_2 （如图1-6所示），通常称转速差 $n_1 - n_2$ 与额定转速 n_0 比值的百分数为调节系统的转速不等率，以符号 δ 标之，并可用下式表示：

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

一般 δ 的范围为3~6%，常用的为4.5~5.5%。

带基本负荷的汽轮机转速不等率应比带尖峰负荷的取得大些。但是，所谓基本负荷和尖峰负荷也是相对的，它是随单机功率增大而变化的。因此，一般希望将转速不等率设计成连续可调，即可按运行情况调整。

实际上，静态特性曲线并非是一条直线，通常也不要求为一直线，所以静态特性曲线在不同区段有不同的斜率。仅用总的平均转速不等率 δ 是不能说明各负荷工况时的静态稳定性的。 δ 只说明汽轮机从空负荷变到全负荷时的转速变化值（同步器位置不变），是一个平均值。因此，有必要引入局部转速不等率 δ^* 的概念。 δ^* 可用下式表示：

$$\delta^* = - \frac{dn}{dN} \times \frac{N_0}{n_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

从图1-6的静态特性曲线可看出，在空负荷附近的低负荷区及额定负荷附近，局部不等率较大；而中间部分曲线较平坦，局部不等率较小。这种形状的静态特性曲线是一般常用的。此外，也有设计成直线型的，只要它能保证在各工况下有足够的稳定性即可。

(二) 转速不等率对运行的影响

1. 静态稳定性

机组应能在各种工况下稳定运转，包括空载运行、并网、部分负荷、额定负荷以及用

负荷等工况。所以，在空负荷附近局部不等率可设计得大些，其目的是为了提_高机组在空负荷时的稳定性，以便于机组的顺利并网。在额定负荷附近的局部不等率也可适当大些，以使机组在经济工况附近稳定运转，提高运行的经济性并且不易自动过载。而曲线中间段（即部分负荷工况）的不等率，由于总的不等率已确定不变，所以就比两头小，但也应有适当限制，否则过小的局部不等率会引起负荷摆动。

2. 并网运行的负荷分配特性

汽轮机并列于电网中运行，其转速取决于电网的频率，因此分配给电网中每台机组的负荷取决于各台机组调节系统的静态特性。例如，图1-7为两台汽轮机组并列运行时的静态特性曲线。假定汽轮机a的静态特性的转速不等率 δ_a 小于汽轮机b的静态特性的转速不等率 δ_b ，当外界负荷减少功率 ΔN ，使电网频率上升 Δn 时，两台机组的负荷都因各自调节系统动作而变化，机组a减少功率 ΔN_a ，机组b减少功率 ΔN_b ，最终 $\Delta N_a + \Delta N_b = \Delta N$ ，而 $\Delta N_a > \Delta N_b$ 。由此得出结论，转速不等率 δ 小的机组，在电网频率变动时相应的功率变动大。推论之，具有水平部分的静态特性，即 $\delta = 0$ ，就会引起汽轮机功率大幅度的摆动，导致机组工作不稳定，甚至引起电网的摆动。所以，静态特性不允许有 $\delta = 0$ 的部分出现（除专用的无差调节情况外），当然更不允许静态特性曲线向上翘，因为这种特性本身就是静态不稳定的。

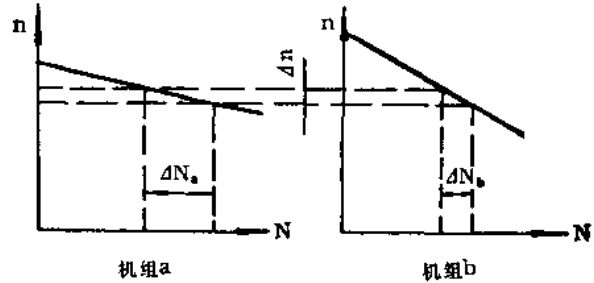


图 1-7 两台机组并列运行时的特性

这样，当调节系统静态特性呈线性时，在具有 m 台汽轮发电机组的电网中，如果总的负荷改变 ΔN 时，则第 j 台机组的功率变化可按_下式计算

$$\begin{aligned} \Delta N_j &= \Delta N \left/ \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{\Delta N_i}{\Delta N_j} \right] \right. \\ &= \Delta N \left/ \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{\frac{N_i}{\delta_i n_0} \cdot \Delta n}{\frac{N_j}{\delta_j n_0} \cdot \Delta n} \right] \right. = \Delta N \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{N_j} \cdot \frac{\delta_j}{\delta_i} \right] \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中： N_i 和 δ_i 为电网中除第 j 台机组以外的其余各台汽轮机的额定功率和转速不等率。

3. 对甩负荷超速的影响

从静态特性看，如果单机运行时慢慢地将负荷从全负荷减到零，那末汽轮机转速就相应增加 δn_0 。但是在电网中并列运行时，如果突然从电网中解列出来，甩掉全负荷，那末仅靠转速升高来关小调节汽阀是需要有一段时间的。在关阀这段时间内，蒸汽仍将流入汽轮机内作功，再加上原来储蓄在汽轮机各段容室中的蒸汽能量，就会使转速大大地超过空载稳定转速 $(1 + \delta)n_0$ 。如果 δ 愈大，在其他条件不变下则动态超速也愈大，所以不希望 δ 过大。动态最大飞升转速取决于调节系统的动态特性，一般可能较静态稳定值大50%。

三、迟缓率

在绘制上述静态特性曲线时，曾认为所有元件的关系曲线均是单值的。实际上，由于调节系统各元件间存在摩擦力、间隙、重叠度等，而使静态特性曲线的上下行线不能重合在一起，形成一条带状（见图1-8）。例如，在调速器中有摩擦力和间隙等存在，那末当转速变化时，只有克服摩擦力和走完间隙的距离后才会使滑环移动，所以就形成aa及a'a'带状的调速器特性曲线。同理，当调速器滑环开始移动时，也需克服传动机构到油动机去的摩擦力、间隙以及借油门重叠度等因素，从而使油动机活塞移动时产生了滞后。因此，也形成bb及b'b'的传动机构特性的带状曲线。再传动到调节汽阀时，也存在迟缓。调节汽阀开关所引起的蒸汽流量和汽轮机功率的改变，可以认为没有迟缓现象。这样，考虑上述这些影响所绘制出的调节系统静态特性，也是一根带状曲线。我们定义在同一功率位置上的转速差 Δn 对额定转速 n_0 之比为调节系统的迟缓率 ε ，用下式表示：

$$\varepsilon = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

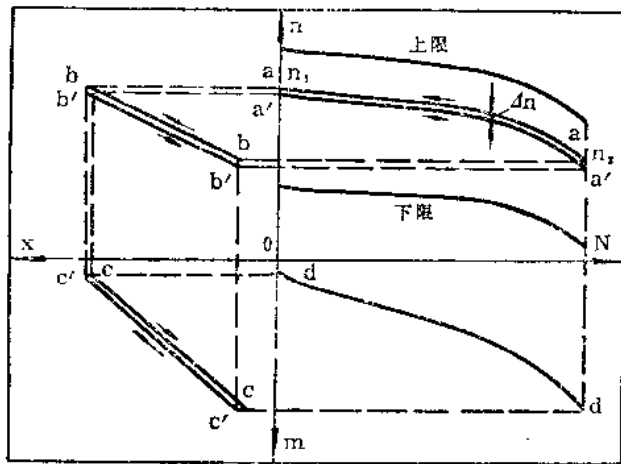


图 1-8 调节系统的迟缓率

迟缓率过大，会引起调节系统摆动并使过渡过程恶化。因此，设计调节系统时，应尽力设法减小各元件的迟缓率，使系统迟缓率减小到最低程度或接近于零。目前，液压调节系统可做到 ε 不大于0.2~0.5%。国际电工会议定为 $\varepsilon = 0.06\%$ 。采用电液调节系统后，可以达到甚至超过这个标准。

一般汽轮机调节系统中存在不大的迟缓率还是允许的。并列运行时，由调节系统引起的功率摆动 $\Delta N/N_0$ 不应超过下列值：

$$\Delta N/N_0 = (1.1\varepsilon/\delta^*) \times 100\% \quad (1-10)$$

单机运行时，相应的转速摆动不应超过 $1.1\varepsilon n_0$ 。

四、同步器

从转速不等率的定义可知，当负荷变化时，汽轮机的转速就按静态特性变化。若功率从空载到满载变化，相应的转速就有 δn_0 的变化。但是并网运行时，必须保持发电机转速（频率）恒定。这就必须在调节系统中装设同步器。它的作用在于：当汽轮机功率从空载

到满载大幅度变化时，藉助同步器在不大的范围内平移静态特性曲线，以使机组转速维持在额定转速 n_0 ，如图1-9所示。

同步器的范围一般为额定转速的-5%到+7%，由图1-9可见：

(1) 静态特性曲线a是同步器在最低位置下的特性线，在汽轮机空负荷时的转速为2850 r/min，即额定转速的-5%。这是考虑到电网频率低了50Hz的5%时，汽轮发电机组在主汽门全开条件下，用同步器控制转速并网，故曲线a称为同步器下限。

(2) 由静态特性曲线b平移到曲线c，表明汽轮机在电网频率为50Hz的条件下，其功率从空负荷增加到满负荷。

(3) 静态特性曲线d表明，在汽轮机空负荷的转速为额定转速 n_0 的 $\delta+(1\sim2)\%$ 时，应考虑到当汽轮机前蒸汽参数降低或电网频率升高(1~2)%时仍可发出全负荷。

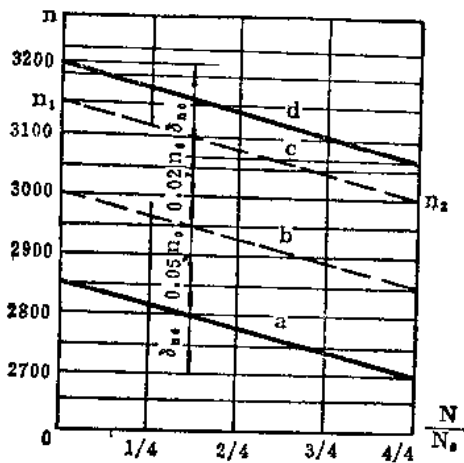


图 1-9 同步器特性

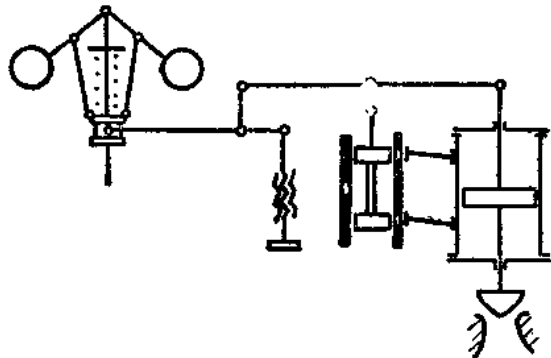


图 1-10 改变传递机构的同步器

同步器的结构基本上可分为两类：一类为具有附加弹簧的同步器，如图1-5所示；另一类为利用改变传递机构的同步器，如图1-10所示（相应的四象限静态特性曲线示于图1-11）。具有附加弹簧的同步器，长期以来已获得广泛应用。虽然这有增加迟缓率的可能，但只要设计合理，仍有不少应用的。具有改变传递机构的同步器，可以设计成在很大范围内控制汽轮机转速的调速器，称为全程调速器。

五、对调节系统静态特性的要求

从以上分析和论述可知，汽轮发电机组要满足在各种工况下稳定运行，应对调节系统的静态特性提出一系列要求。为了完整和清晰起见，参照国际电工委员会(IEC)45号建议书，现将这些要求汇总于后：

(1) 有随功率增加而转速下降的可调倾斜特性。倾斜特性用转速不等率 δ 表示，一般 δ 取3~6%，不允许超过6%。

(2) 局部不等率 δ^* 的最小值应不小于总不等率的0.4倍。

(3) 在0%到10%负荷范围内，最大局部不等率无一定限制。

(4) 在90%到100%负荷范围内，最大局部不等率不应超过总不等率的三倍（除最