

高等学校交流讲义

水轮机调节及其 控制的自动化

王膺福编

只限学校内部使用



中国工业出版社

前 言

这本“水轮机调节及其控制的自动化”是根据高等学校水力机械水轮机专业的教学大纲编写的。内容主要是叙述水轮机调节的基本理论、调速器的结构、水轮发电机组自动化等。

本书的内容是根据苏联专家П. А. 布达也夫在哈尔滨工业大学讲授的“水轮机调节”课程的内容及斯密洛夫专家所著《水轮机调整》一书为基础，并根据几年来贯彻党的教育方针、进行教学改革和参加双革运动的成果，以及教学实践的经验，对内容作了增减及修改。

在编写本教材时，编者力求全面地体现党的教育方针，密切地结合我国的实际情况；在内容方面尽量地引述双革运动中的成就；在编排上竭力使前后各章节具有科学的系统性和完整性；对于问题的阐述努力以辩证唯物主义观点作为指导思想。

然而，尽管编者主观上如此要求自己，但是限于本身的思想水平与学识的浅薄以及编写时间的短促，这本教材仍会有很多缺点，甚至可能还有错误，诚恳希望读者和有关方面对本书给予批评和指正。

考虑到教学与生产的需要，本书以较多的篇幅详细地论述了调节及调节保证计算的基本原理和推导演算。在教授此一部分内容时，可以根据学校的具体情况作适当的增删。

限于编者的业务水平以及编写时间的短促，对在本书内未能列入近代调速器制造业中的最新技术成就——电液调速器而深感遗憾。

读者对于本书内容的一切批评和意见请惠寄哈尔滨工业大学水力机械专业委员会。

编 者

一九六一年六月于

哈尔滨工业大学

目次

第一章 水轮机调节概论	3	§ 5-9 稳定区域	77
§ 1-1 调节概念及其发展简史	3	第六章 实际调速系统的调节过程	79
§ 1-2 水轮机调节的任务	4	§ 6-1 水轮机调节实际过程的动态学特征	79
§ 1-3 水轮机调节的目的	6	§ 6-2 模拟线性法	85
§ 1-4 实现水轮发电机组调节的途径及方法	7	第七章 调节保证计算	89
§ 1-5 调节器的分类	8	§ 7-1 调节保证计算概论	89
§ 1-6 调速器静态特性曲线	8	§ 7-2 转速变化率(暂态不均匀率)	89
第二章 水轮机调速系统原理图	12	§ 7-3 关于水轮机设备中的水锤	94
§ 2-1 水轮机调速系统原理的概论	12	§ 7-4 水轮机调节保证计算(精确计算)	111
§ 2-2 直接作用式调速系统原理图	13	§ 7-5 水轮机调整时间	120
§ 2-3 不带有硬反馈装置的间接作用式调速系统原理图	16	§ 7-6 水轮发电机组转动质量惯性力矩(GD^2)的确定	123
§ 2-4 带有硬反馈装置的间接作用式调速系统原理图	19	第八章 调速器元件结构	125
§ 2-5 带有软反馈装置的间接作用式调速系统原理图	20	§ 8-1 飞摆	125
§ 2-6 带有残留不均匀机构的间接作用式调速系统原理图	26	§ 8-2 配压阀	129
§ 2-7 带有变速机构的间接作用式调速系统原理图	28	§ 8-3 放大器	141
§ 2-8 带有开度限制机构的间接作用式调速系统原理图	30	§ 8-4 缓冲器	145
§ 2-9 带有多级放大器的间接作用式调速系统原理图	31	第九章 油压装置	151
第三章 调速器原理简图	33	§ 9-1 油压装置的概论	151
§ 3-1 混流式水轮机的调速器原理简图	33	§ 9-2 油压设备(MHY)的标准化	153
§ 3-2 双重调节的概论	34	§ 9-3 油压设备(MHY)的计算及选择	154
§ 3-3 转桨式水轮机的调速器原理简图	35	§ 9-4 油压设备(MHY)元件的结构	162
§ 3-4 高水头混流式水轮机的调速器原理简图	39	第十章 调速器	169
§ 3-5 冲击式水轮机的调速器原理简图	41	§ 10-1 调速器的分类	169
第四章 水轮机调速器的静态学	45	§ 10-2 调速器的技术要求及其布置	170
§ 4-1 静态学概论	45	§ 10-3 水轮机调速器的标准化及规格化	171
§ 4-2 离心摆的平衡方程式及其曲线	50	§ 10-4 调速器的选型	172
§ 4-3 离心摆的不灵敏度	52	§ 10-5 通流式调速器	178
§ 4-4 离心摆的静定稳定	54	§ 10-6 压力油槽式调速器	182
第五章 调速系统的动态学	57	§ 10-7 YK型调速器	196
§ 5-1 动态学概论	57	§ 10-8 PK型调速器	205
§ 5-2 离心摆的运动方程式	57	§ 10-9 T型调速器	212
§ 5-3 水轮发电机组的运动方程式	58	第十一章 水轮发电机组及其辅助设备自动化	222
§ 5-4 动态学中的概念名词	58	§ 11-1 水轮发电机组及其辅助设备自动化的概论	222
§ 5-5 直接作用式调速系统的动态分析	59	§ 11-2 水轮发电机组润滑系统的自动化	224
§ 5-6 具有硬反馈装置的间接作用式调速系统的动态分析	66	§ 11-3 水轮发电机组冷却系统的自动化	230
§ 5-7 稳定条件及稳定的鉴别	70	§ 11-4 水轮发电机组消防系统的自动化	230
§ 5-8 具有软反馈装置的间接作用式调速系统的动态分析	74	§ 11-5 水轮发电机组制动系统的自动化	231
		§ 11-6 水轮发电机组的辅助设备操作的自动化	231
		§ 11-7 水轮发电机组控制系统的自动化	234
		第十二章 调速器试验	241
		§ 12-1 单独机构的试验	241
		§ 12-2 调速器的一般试验	243
		参考文献	245

第一章 水輪机調节概論

§ 1-1 調节概念及其发展簡史

水輪机調节乃是調节技术在水輪机中的应用。就調节的含义來說，任何机器能借自动装置的作用，而保持某定工况，或根据事先給定的技术方案进行动作的过程即为調节。此机器本身即被称为調节对象。該自动装置即是調节器。但这不等于說，在調节器与調节对象之間不須要任何的連系元件就能实现調节的任务。問題恰巧相反，不但須要具有連系元件，而且只有在合理地采用这些机械的、电气的或液压的連系元件，才能有保障的实现調节的任务。

由調节对象、調节器及連系元件所組成的封閉回路，即构成了調节系統。

在古典的調节系統中企图区分开这些装置以及它們之間的关系，往往是枉費心机的。譬如在十七世紀五十年代俄国包依立斯所发明的钟表，它既是古典調速系統的代表，同时也是調节原理被应用在生产技术中的萌芽。

調节技术应用于工业生产中，那还是在世界上第一台蒸汽机出世后的事情。在那时候仅是为了解决鍋炉內的水位保持在一定范围的目的，由俄国И. И. 包尔祖諾夫首先創造了水位調节器（图1-1）。

在这个調节器內由浮筒表測量水位，浮筒能影响鍋炉的进水，并保証在鍋炉內的进水和消耗之間保持平衡，因而使鍋炉內的水位被保持一定范围内。

以后，这个被用来調整鍋炉內水位的自动調节原理，又被瓦特用于調节蒸汽机的速度。由于技术上的发展和原动机功率的增大、精确保持原动机的速度不变的要求提高，因而調节的问题亦复杂了。正如本书內叙述的，使得調节器和調节对象分了家，調节器的調节系統和結構亦相应地复杂。

在十九世紀五十年代的后期，自动調节技术已被广泛地应用于电器技术中，如当时俄国卓越的电气师К. И. 康斯坦丁諾夫发明了电調节器。

随着当时工业的不断发展和調节技术的广泛应用，十九世紀末叶，以彼得格勒工业大学为中心，以該校教授И. В. 卫兴格勒德斯基为代表，自生产中归納了現象和总结了經驗，又通过了无数次詳尽地試驗，最后提出了調节的理論，为近代的調节原理奠定了基础。

在这以后調节技术不仅向着纵深方面发展，同时亦在其他国民經济技术部門有了广泛的应用。

調节技术应用于水輪机中要比起人們学会利用水力資源稍后一个时期。当时所应用的調节技术还都是最古典的調速系統，但由于它具备着結構简单，操作簡便的优点，不仅解决了当时的水力发电的需要，即使在今天的小型农村电站中还具有着现实的意义。

随着水力发电工程的发展，依据各种水輪机的特性創造了許多用于水輪机的自动調速

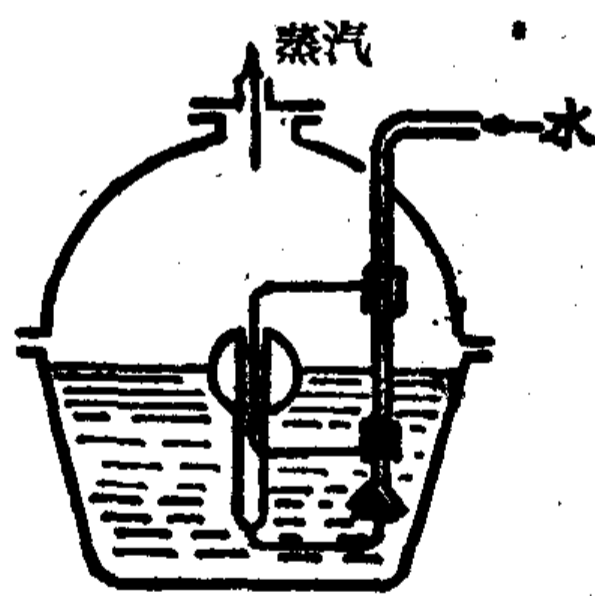


图1-1 水位調节器。

结构。

苏联在1917年前也如我国在解放前一样，是没有调速器制造业的。十月革命以后，才开始了调速器的制造业，先后生产了各种中小型的调速器，如KЭ-150, KЭ-350, KЭ-1000, 及KЭ-3000。在卫国战争后，苏联列宁格勒金属工厂为修建国内的大型水电站，开始生产了大型YK型调速器。在完成此大型调速器后，调速器制造业有了飞跃的发展，又先后为巨型水电站生产了结构简单、具有良好调节性能的PK型和P型调速器。

我国自解放以来，在党和政府的正确领导下，在苏联专家帮助下，短短的十余年内，从一个没有调速器制造业的水平，通过仿造、改进、试制等阶段，已达到了能够自己设计和制造的阶段，并且又在这个基础上开始制定我国的调速器的系列。

水电站的自动控制方面亦逐步完成了改建任务，使原先是手动操作的水电站都成为程度不同的自动化水电站。目前，在我国建设的大型电站，也都实现了全部自动化。

在新的形势鼓舞下，我国所有的调速器工作者都满怀实现祖国工业化的胜利信心，向着更高阶段的自动调节技术进军。

§ 1-2 水轮机调节的任务

水电站电能质量的好坏与水电站机组的运行稳定有着密切的关系。水电站发电机及其原动机——水轮机好似人体内的心脏，它们的工作好坏，将直接影响着电能质量的优劣。如何使发电机及水轮机合理运行，或者使机组能根据事先所规定的技术要求，和技术方案进行运行，乃是这门课程的中心课题。

我们都知道水轮机是将水的能量转换为机械能量的机器。要使这种机械能量变成电能，还必须通过不同的联结方式与发电机组合起来。联结方式可以是齿轮传动、皮带传动（万向铰链传动）、或是法兰联结，及整轴传动（水轮机轴即是发电机轴）。

由于发电机的端电压较低，为了减少输电线路电能损耗，以及输电设备经济合理起见，

在水电站内设有升压设备，将低电压转变为高电压，然后通过输电线路，把电能输往各工厂、矿山等单位，以满足客户用电需要。为了简化今后的研究分析，将这些单位的用电统称为负荷。负荷在每昼夜、每周、每月、每年都是在变化着的。在发电厂里通常把每昼夜的负荷变化用日负荷变化曲线（图1-2）表示。同样的可以有周负荷、月负荷和年负荷变化曲线。但发电厂感到兴趣的、乃是日负荷变化曲线。因为它是水电站运行的技术依据。

水轮发电机组（水轮机和发电机的组合）要保证它的工况适应于负荷的变化。倘若水轮发电机组不随着负荷的变化而作相应的调节，将使电能的质量，受到严重的影响。其后果不难自水轮发电机组的运动调整过程分析中获得证实：认为水轮发电机组的运动即是刚体绕某一固定轴线的迴转

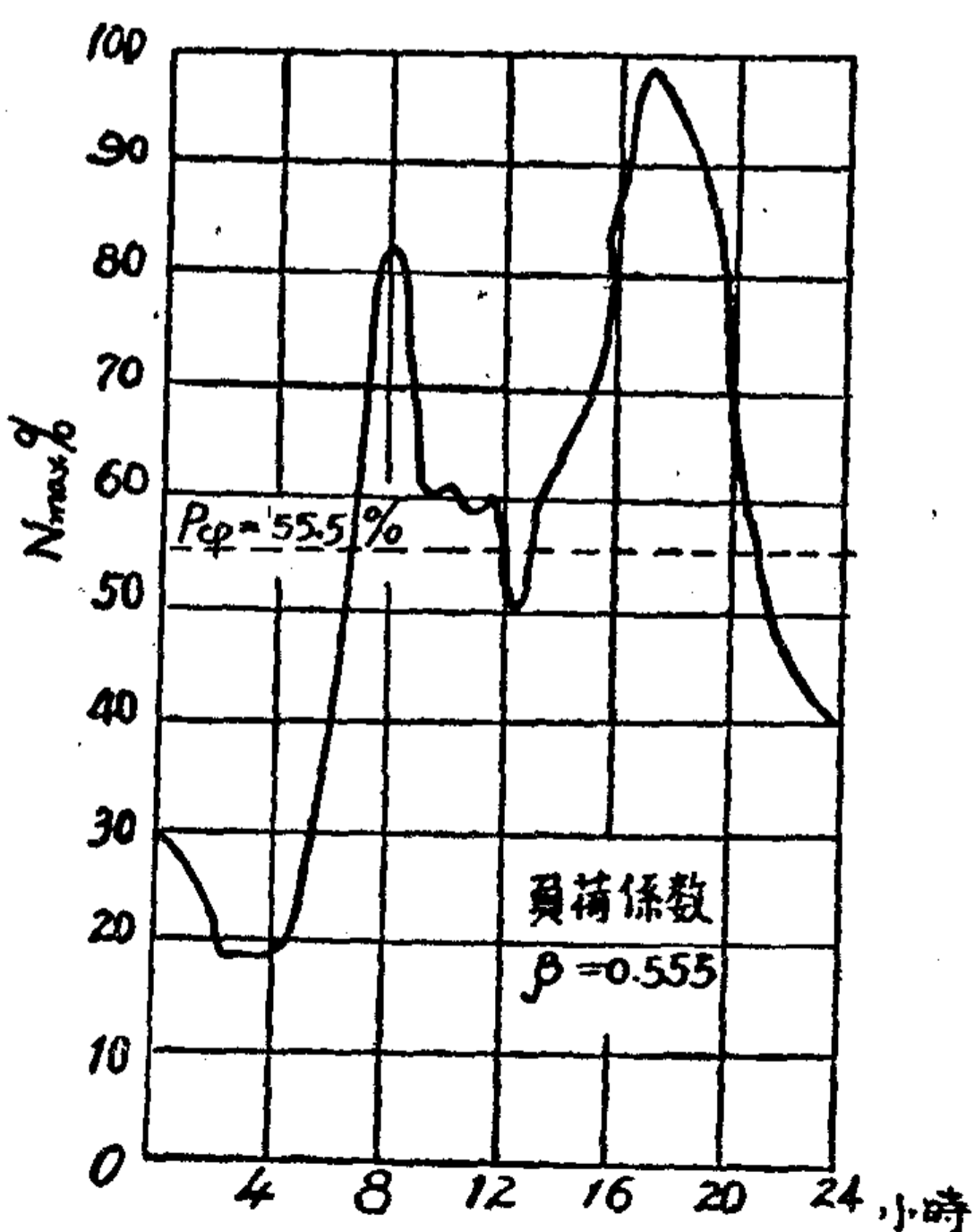


图1-2 日负荷变化曲线。

运动是完全相当的，这样就可以运用人们所熟悉的转动定律：“一物体绕某一轴线的力矩应等于该物体对此轴线的转动惯量与角加速度的乘积”来说明水轮发电机组的运动规律，如以微分方程式表之，即得

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c \quad (1-1)$$

式中 I ——水轮发电机组转动部分的转动惯量。它由于发电机转子、主轴等转动惯量组成；

$$I = I_{\text{发}} + I_{\text{水}} + I_{\text{主}}$$

通常式中 $(I_{\text{水}} + I_{\text{主}})$ 转动惯量很小。在工程技术计算中往往可以略而不计，这样并不影响对今后问题本质分析。因此在本书以后所遇到的转动惯量，都是指发电机转子的转动惯量（即 $I \approx I_{\text{发}}$ ）。

式中的 ω 是指水轮发电机组的角速度； M_d 是表示作用于水轮机工作轮上的动力矩（或称水力矩）； M_c 是指水轮发电机组转子阻力矩。方程式（1-1）被称为是水轮发电机组的运动方程式。水轮发电机组的负荷是随着日负荷变化而增减的，倘若水轮发电机组在负荷发生变化后，不作相应的调节，那末水轮机的出力可能就要大于或小于发电机所需要的出力，也就是说作用于水轮机工作轮上的水力矩与发电机转子上的阻力矩的平衡条件遭到破坏，这样水轮发电机组的转速就产生变化。转速的增减对于水轮机来说，就会使得工况发生变化，很有可能由原先的高效率工况转换到低效率工况，造成一定程度的损失和浪费，更严重的是将引起工作的不稳定，使水轮发电机组发生振动，影响着整个电站的安全。对于发电机来说，将会引起所发出的电能的频率及电压的波动，在这种波动超过规定的允许范围时，会引起严重的事故，此时的发电机亦处于不稳定状态下运转。调节的任务就是要保证避免上述缺陷的发生。严格的说来，调节的任务即要保证水轮发电机组处于稳定工作规范下运转。那末什么是稳定工作规范呢？我们说凡是不因负荷的变化，而水轮发电机组仍以原有转速保持均匀旋转，或转速的变化是在允许的波动范围内的工况，称之为稳定工作范围。反之凡是因负荷的变化而使水轮发电机组转速发生上升或下降，超过允许的波动范围的工况，称之为非稳定工作范围。

保证水轮发电机组处于稳定工作范围运行，仅是调节任务的一个方面，随着水电事业的飞跃发展、自动化程度的逐步提高、电力系统的不断完善，都要求水轮发电机组按规定的技术方案进行运行。如在负荷发生变化时，希望更多的来调整转桨式水轮机所承担的负荷，尽可能的不变混流式水轮机负荷，以达到合理分配负荷的经济运行方案，避免水轮机处于严重气蚀工况下运行。在无人控制的全部自动化水电站中，能根据电力系统用电的需要，进行自动投入、并联、分配负荷的运行等等。因此水轮机调节的第二个任务即是要满足水轮机能按给定的技术方案进行运行。

要使水轮发电机组经常处于绝对可靠的状态下工作，就必须对它在运行中的一切不正常现象，不仅要能起到保护的作用，并且要能够及时的分析工况和调整工况，如通过调速器的特殊装置来对水轮发电机组的飞逸转速、滑润、发热等不正常工况的监督和分折，这就是水轮机调节的第三个任务。显然，要保证水轮机调节任务的全面完成，企图依靠手动操作是困难的。因而在这种情况下，水轮发电机组的调节都是自动操作的。

§ 1-3 水輪机調节的目的

研究和分析水輪发电机组調节的目的，为解决实现調节任务的必要性是完全必要的。认为水輪发电机组要实现調节的必要性，可以由如下的几个方面来加以說明：

欲保證电能的质量，水輪发电机组就必须要进行調节。当水輪发电机组的轉速变化时，由于电能的頻率是由轉速来維持的，即

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-2)$$

式中 n —— 水輪发电机组的轉速；

f —— 頻率或称周波；

p —— 发电机的极对数。

頻率随时发生变化。因此在电力系统工作的电动机，以及由电动机驅动的所有机器的轉速，都产生了变化。但是在許多大工业生产中，对于交流电頻率的准确性要求，从表 1-1 所示的允許波动范围即能看出，都是很高的。

表 1-1 各生产部門所用机器的容許轉速(頻率)偏差表

生产部門或机器类别	机器轉速对其正常的容許偏差 (%)	生产部門或机器类别	机器轉速对其正常的容許偏差 (%)
大型发电站	0.5	木工厂	20
造纸机	1.0	鋸木厂	30
細棉紗厂	2.0	脱粒机、谷物联合收割机	± 8
制綫厂	3.0	清谷机	± 5
小型电气照明装置	4.0	打草机	± 11
磨粉机	10	飼料加工机	5~10
机械制造厂	15		

对于某些特殊工业（如化工、冶炼）、国防工业及医疗机关，对頻率的容許偏差更为严格。因此在电力法規中規定了电力系统应保持在 50 周波，其波动范围一般地不允許超过 $\pm 0.2\% f$ 。由此可知，水輪发电机组的調节是非常重要的。

欲使水輪发电机组能够投入电力系统內参加工作，就必须要进行調节。近代电力工业发展的趋势是：把各个电站联合起来組成一个龐大的电力系统，这样的做法可以更加合理的使用各台設備，充分發揮机器設備的潛力，同时也有利于电能质量的保證。但是要安全的使每台水輪发电机组投入电力系统內工作，就得要保證必須的条件，即欲参与电力系统內工作的每台水輪发电机组之由轉速所維持的頻率，必須与电力系統的頻率相一致；或者其頻率的偏差值是在 $\pm 0.2\% f$ 的容許範圍內。

为了更能合理的分配負荷，水輪发电机组必須进行調节。有关負荷的分配将于以后的章节內作專門的討論，在这里仅以最簡單的实例加以說明調节的必要性。如某台水輪发电机组为了滿足参加电力系统內工作，它只能在 N_1 負荷下运行，见图 1-3 上的 O 点，但就水輪发电机组的效率來說却是最不利的工况，它只有在 N_2 的工况下，才是具有最高的效率，但根据調速器静态特性曲綫，当負荷为 N_2 时的轉速已不是原来的 n_1 而是 n'_1 ，且 $n'_1 > n_1$ ，这样此台水輪发电机组所发出的电能的頻率 f' 要比电力系统內的頻率 f 高，即 $f' > f$ ，其結果就使得此台水輪发电机组自电力系統中脱离出来(簡称解列)，如要保證不解列，

又能处于最优工况下运行，则唯一的方法，就是通过调节，将调速器静态特性曲线平行的移动到新的位置，如图1-3上的虚线，不改变其功率，（即 $N_1 - N_2$ 之差）。

为了保证水电站某些设备的寿命，水轮发电机组必须进行调节。如防止水轮发电机组各轴承工作不正常而引起的严重事故，只要机组设备工作偏离允许范围时，备用即能自动投入或者迫使水轮发电机组自动停机，以达到事故保护的作用。这就需要轴承的信号器发出信号，通过实现调节的机器——调速器的动作，来达到上述目的，即备用自动投入或迫使机器紧急停机。

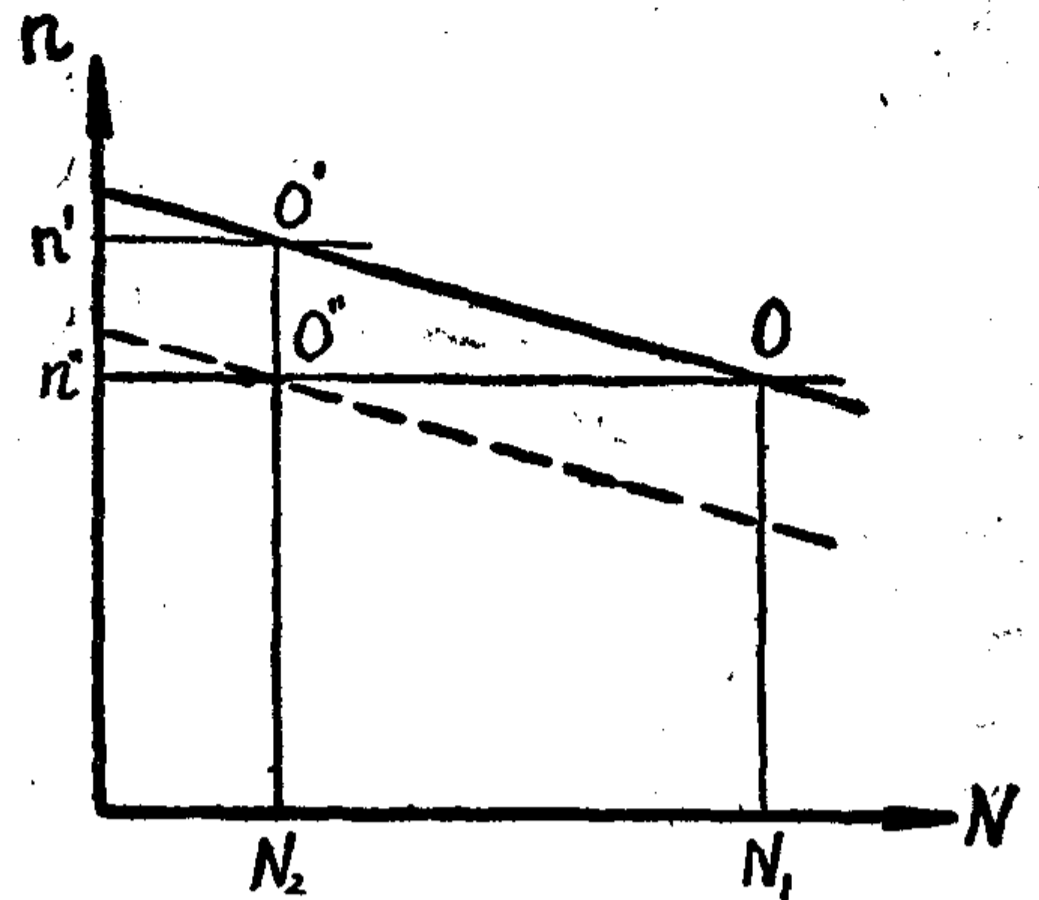


图1-3 调速器特性静态曲线。

§ 1-4 实现水轮发电机组调节的途径及方法

识别水轮发电机组是否处于稳定工作范围运行，或者是说水轮发电机组在什么时候需要调节，则完全可以由其转速是否仍以原有的转速作均匀的旋转，或者其转速的偏离是否在允许的 $\pm 0.2\% n_n$ 范围内来作为依据。因此保持原有转速或者调整水轮发电机的转速，使它经常在允许的波动范围内，就成为实现水轮发电机组调节的必要手段和有效的途径。至于其方法不难自水轮发电机组运动方程式的研究与分析中获得：

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_o - M_c。$$

（一）利用飞轮来实现调节。这个方法是利用具有较大转动惯量 I ，来保持转速的变化不超过允许的范围，但它不能够根据负荷的变化起到调节的作用。就限制转速的变化来说，由于水轮发电机组有甩最大负荷的可能性，这就必须考虑一个既笨重而又庞大的飞轮。显然的这种方法仅适用于目前的农村，用电要求尚不很高，且生产调节器又无条件情况下。

（二）利用相应的改变水轮机工作轮的水力矩来实现调节。这种方法是使能量经常获得平衡来实现调节的，这种随着负荷（或发电机转子上的阻力矩 M_c ）的变化，相应的改变水轮机出力（或水轮机工作轮上的水力矩 M_o ）的方法，是当前在水轮发电机组调节中用得最为广泛的一种方法，根据水轮机能量的基本方程式

$$N = M_o \omega = \frac{HQ\gamma\eta}{102} \quad (1-3)$$

得知， M_o 的调节可以通过改变水头，流量和效率来达到，今一一分析于后：

（1）改变水头来达到调节 M_o 的目的，显然这种方法不但是不经济，而且也是无法满足调节的需要。因为转速的平衡需要在极短时间内完成，而水库的水位就无法在这样短促的时间内，按着换算后的水头要求进行调节，所以这种方法是沒有实用意义的，而且又是最不经济的方法。

（2）改变效率来达到调节 M_o 的目的。这种方法与上面一种方法一样，也是最不经济的方法，不宜采用。

（3）改变流量来达到调节 M_o 的目的。这是一种目前用得最多的方法，它的变化完

全适应于负荷的变化，根据水轮机的流量调节方程式：

$$Q = \frac{\frac{\eta_2 g H}{\omega} + u_2}{\frac{\Gamma_1}{\Gamma_2} \frac{K_1}{\operatorname{tg} \alpha_0} + \frac{K_2}{\operatorname{tg} \beta_2}} \quad (1-4)$$

流量的调节可以通过改变导叶开度 α_0 、高度 B ，或工作轮叶片的出口角 β_2 来实现，也可以协联的改变 α_0 和 β_2 。采用这种和那种的调节流量的方式，将取决于所采用的水轮机结构，而水轮机结构本身的选择，又是以电站的具体条件作为依据的。所以很难对这些方法作出具体的比较。根据现有水轮机结构，仅改变导叶开度 α_0 的有混流式（或称法兰西斯）和旋桨式水轮机，仅改变工作轮出口角 β_2 的有调叶式（或称托曼式）水轮机，仅改变导叶高度 B_0 的有列索新式水轮机，协联改变导叶开度 α_0 及工作轮叶片出口角 β_2 的有转叶式（卡布兰式）水轮机。在冲击式水轮机中，流量的调节是通过协联的改变喷嘴行程及折向器（或偏流器）的开度来实现的。关于这些水轮机的具体调节方法和作用原理将在以后的专门章节内进行详细的讨论。

§ 1-5 调节器的分类

水轮发电机组调节的任务，即是要保证它能经常处在稳定工作规范运行。就其本质来说，乃是要保证它的工况适应于负荷的大小。由于水轮发电机组本身的结构已经足够复杂，如果在此机器上再附设一套设备来实现调节，势将使结构更为复杂，且在维护运转上带来了极大不便。因而实现调节任务的特殊装置是在电站中单独设置的，这个装置即是调节器。我们由水轮发电机组的运动方程式中得知，当其负荷发生变化时，可以通过如下的信号来反映：转速发生变化、角加速度发生变化、能量差额 $M_0 - M_c$ 发生变化。然后通过调节器的作用使 M_c 获得了相应的改变，以达到能量不断的平衡，而使水轮发电机组的转速稳定下来，并使工况适应于负荷的大小。因此调节器根据不同信号而动作的原理可以分成：

- (1) 速度调节器或称调速器；
- (2) 加速度调节器或称调加速器；
- (3) 负荷调节器或称调负荷器。

除了这三种以外，也还可以有速度和加速度组合的调节器。由于调速器的结构比起其他种调节器要简单，所以目前也是用得最广泛，我们今后所研究的对象，亦将以调速器为主。

§ 1-6 调速器静态特性曲线

为了能鉴别水轮发电机组调节质量的好坏，就得对于调速器静态特性曲线作番解释和研究。当然在研究此一问题时，不能脱离水轮发电机组运动规律作孤立静止的分析，必须要密切的与它联系起来才会获得正确的结论。根据水轮发电机组运动方程式

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_0 - M_c$$

为使 M_c 能够随着 M_0 的变化而作相应的变化，就必须研究当稳定工作规范变化时，作用于水轮机工作轮上的水力矩及发电机转子上的阻力矩与转速变化的规律性。换言之即要研究水轮机及发电机的静特性的规律，也只有首先掌握住了它们以后，才能做到使 M_c 完成相应

的正确变化。

(一) 水輪机的靜态特性曲綫是指在滿足穩定工作規範的條件下, 水輪机在規定開度 $a_0 \tau$, 作用于工作輪上的水力矩 M_θ 与其角速度的相互关系。如以曲綫来表示此一关系的話, 即如图 1-4 所示。此一曲綫的繪制, 是由万能特性曲綫而来, 其步驟如后:

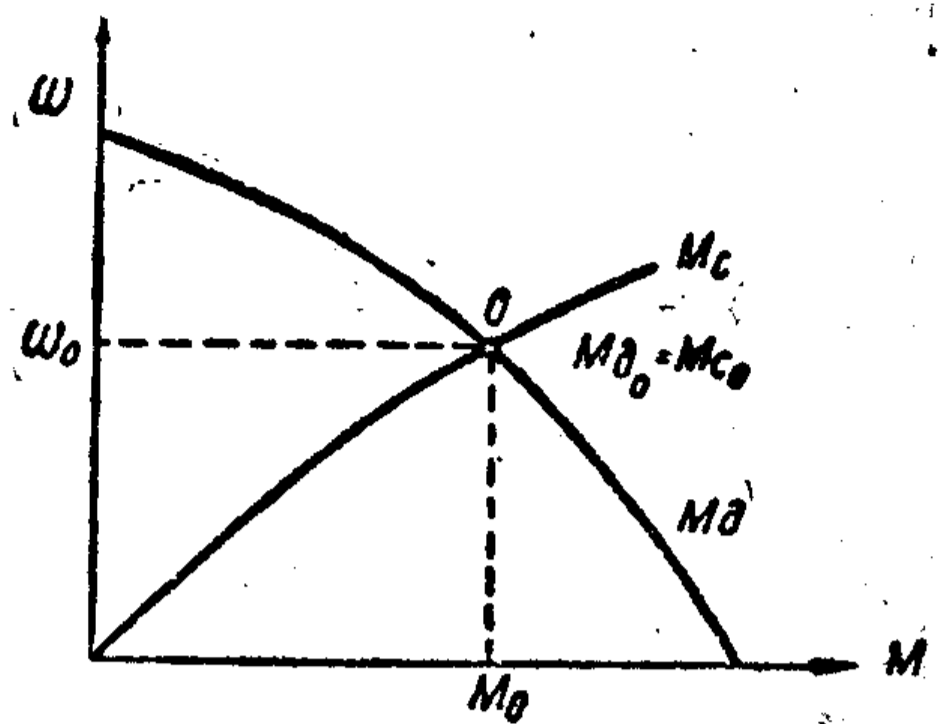


图1-4 水輪机发电机的靜特性曲綫。

(1) 計算与 a_0 相适应的模型開度 a_{0M} 。

$$a_{0M} = a_0 \frac{D_0}{D_{0M}} \cdot \frac{z_{0M}}{z_0}$$

模型直徑 D_{0M} 及模型工作輪导叶数目 z_{0M} , 可由水輪机模型的通用特性曲綫中得知。工作輪直徑 D_0 及叶片数目 z_0 及导叶開度都是已知的。

(2) 在給定的 ω 下計算出 n'_1

$$n'_1 = \frac{30}{\pi} \frac{\omega D_0}{\sqrt{H}}$$

式中 H —— 水輪机在此时的工作水头。

(3) 根据通用特性曲綫在已知的 a_{0M} 及 n'_1 下查得 Q'_1 (參见图 1-5)。

(4) 用 M_θ 計算公式算出在此開度 a_0 及在此角速度 ω_i 下的 $M_{\theta i}$ 。

$$M_{\theta i} = \frac{30}{\pi} \gamma D_0^3 H \frac{Q'_1}{n'^2_1} \eta \quad (1-5)$$

η 可由通用特性曲綫上查得。按不同的 ω_i 求得不同的 n'_1 及 Q'_1 , 再按公式(1-5)計算出 $M_{\theta i}$, 最后把这些点連接起来成为一根曲綫(參见图 1-6 上的曲綫 AB), 該曲綫即为在開度 a_0 下水輪机靜态特性曲綫。

以同样的方法可以画出其他不同開度下的 $H_\theta = f(\omega)$ 曲綫 (參见图 1-6 上的 A_1B_1, A_2B_2 曲綫)。在一定開度下水輪机靜态特性曲綫的 M_θ 是随着 ω 的增加而减小, 这是能量等衡

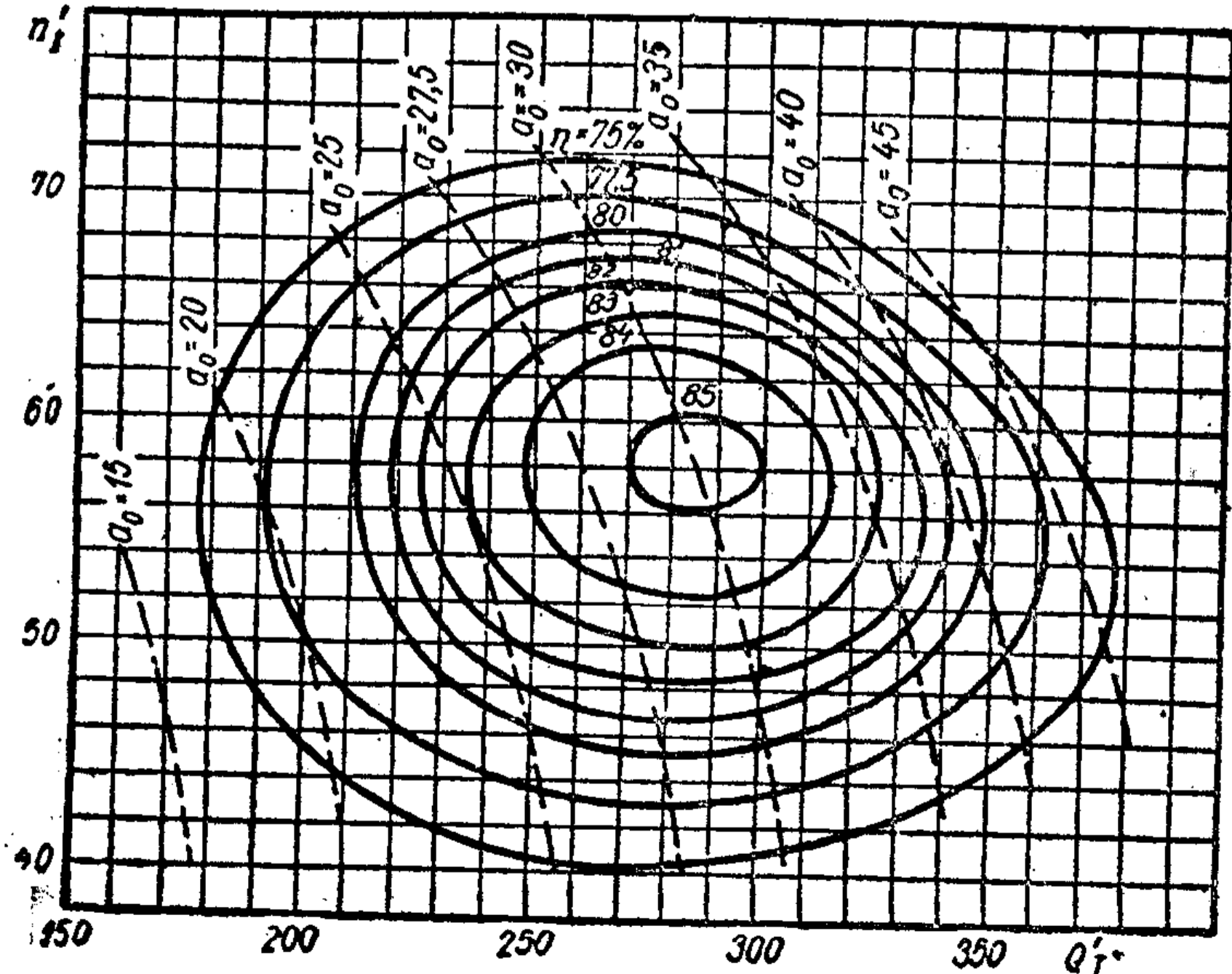


图1-5 模型水輪机的通用特性曲綫。

的結果。

(二) 发电机靜态特性曲綫 (或称負荷曲綫) 是指在一定开度下 (即輸入能量不变的条件下), 作用于发电机轉子上的阻力矩与水輪发电机组角速度的关系。如以曲綫来表示, 此关系即如图 1-6 上的曲綫 CD 。

AB 和 CD 两曲綫的交点 “ O ”, 即表示水輪发电机组在此負荷下的稳定工作范围点。以同样的方法可以得出在开度 a'_0 、 a''_0 下水輪发电机组的稳定工作规范点 “ O' ” 及 “ O'' ” (参見图 1-6)。在輸入能量不变的条件下, 作用于发电机轉子上的阻力矩是随着轉速的上升而增加。

为使問題明朗清楚起見, 假定电力系统仅由一台水輪发电机组来供电, 則在电力系统內工作的生产机械的轉速将随着水輪发电机组轉速的升高而提高, 它們所消耗的功率亦勢将随之增高。显然, 其后果必将是引起作用在水輪发电机组轉子上的阻力矩的增加。这样看来, 当負荷发生变化时, 如以甩負荷为例, 由于水輪机靜态特性的作用, 即使不进行流量的調节其 M_e 是随着角速度的增加而减少。由于发电机靜态特性的作用, 当其轉速上升时作用于发电机轉子上的阻力矩有增加的趋势。这种两重的作用, 有可能使能量获得新的平衡而使水輪发电机组处于稳定工作范围点運轉。那末是否还有进行調节的必要呢? 我們說, 調节还是必須的。为此我們假定水輪发电机组在开度 a_0 下的水輪机靜态特性曲綫为 AB ,

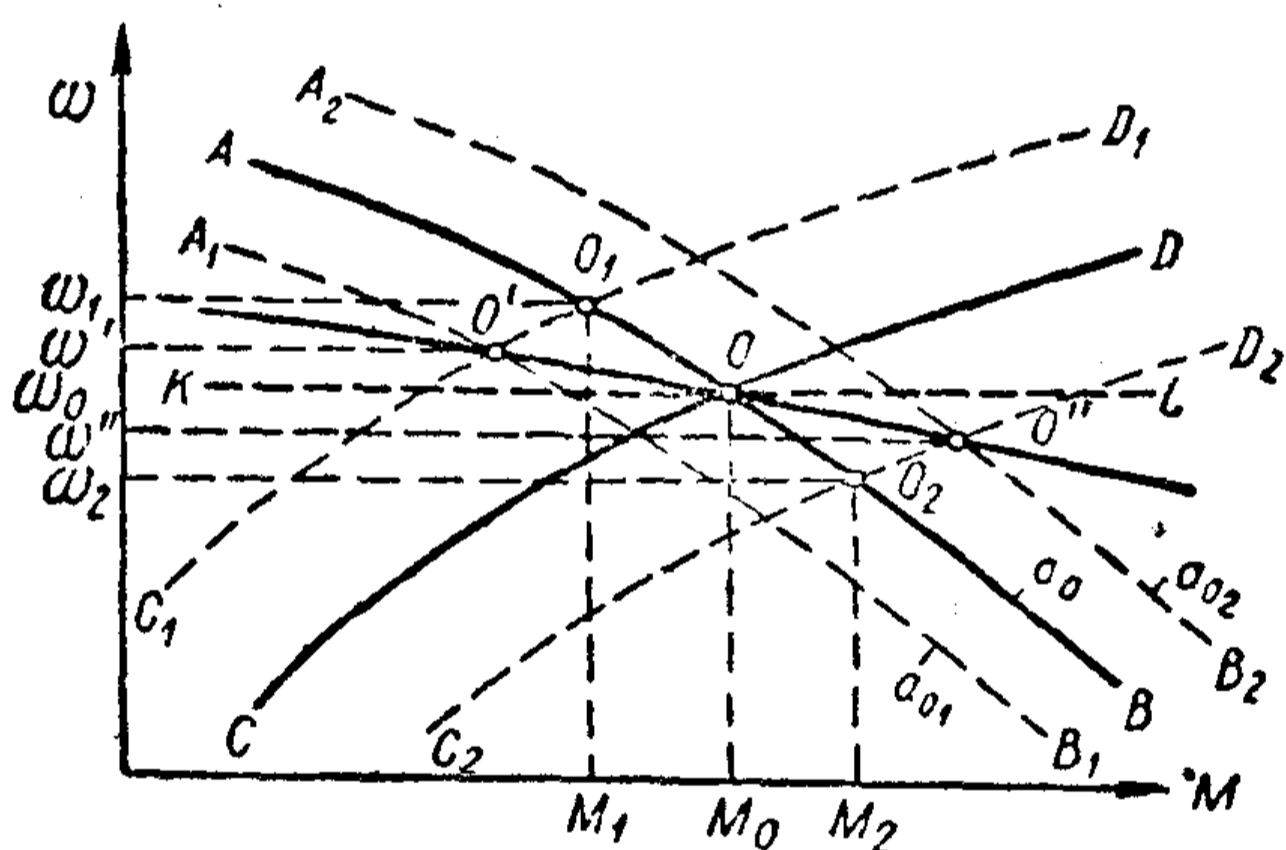


图1-6 調速器靜态特性曲綫分解图。

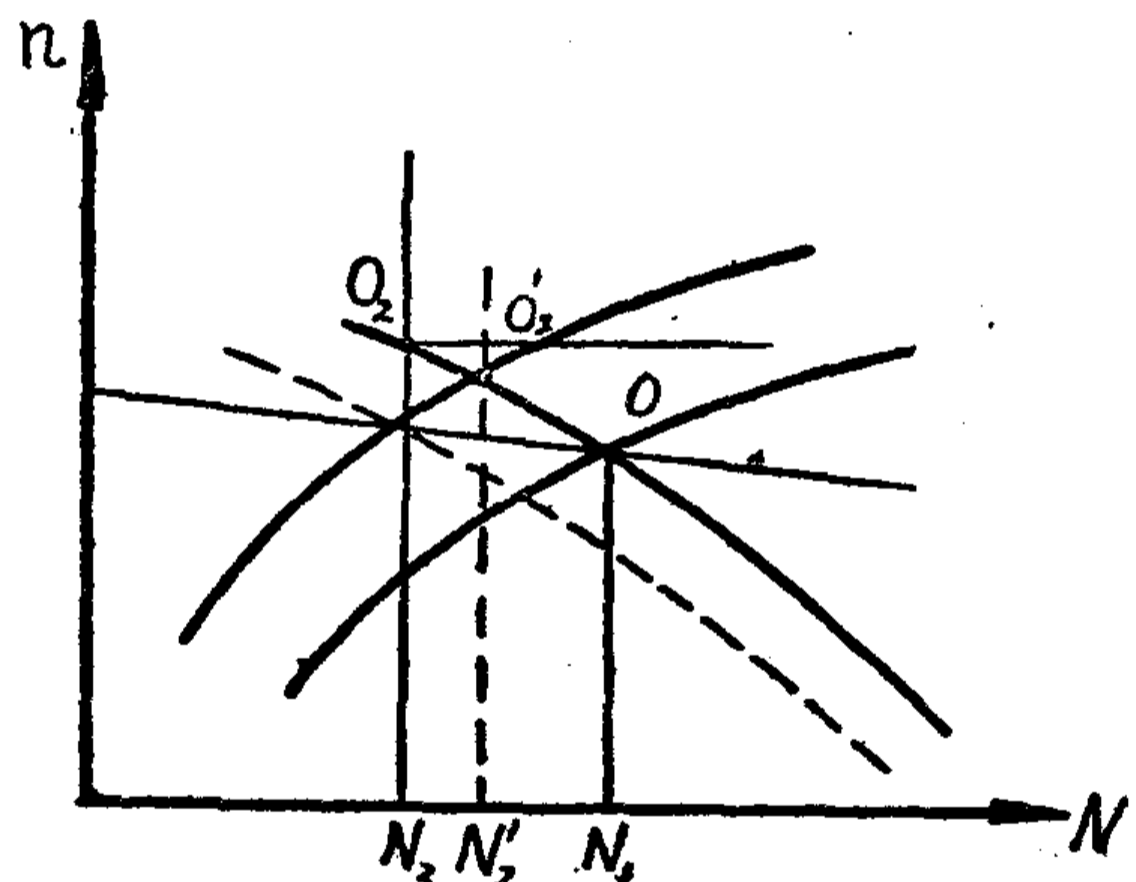


图1-7 調速器靜态特性曲綫分析图。

发电机靜态特性曲綫为 CD , 則 AB 和 CD 两交綫的交点 “ O ” 即为此开度下 (此負荷下) 水輪发电机组的稳定工作范围点。倘若現在的負荷发生甩負荷, 即由原先的 N_1 变成 N_2 , 而水輪机的輸入能量仍保持不变, 如仅考虑水輪机靜态特性性能, 則新的稳定工作规范点可以是 O_2 。如再考虑到发电机靜态特性曲綫性能, 則其稳定工作规范点为 “ O'_2 ”, 其位置取决于水輪机及发电机靜态特性的性质。但其轉速已由原先的 n 升高到 n'_2 , 而此时水輪机的升力为 N'_2 , 通过水輪机的流量并没有任何的减小, 也就是說有着 $N_1 - N'_2$ 的能量未作功而被损失掉了。因此在此时如不进行調节, 則一方面是不經濟, 另一方面电力系统內机組的轉速升高, 当其超过允許值时, 会造成严重的后果。

如果电力系统內不是单机运行, 而是由許多水輪发电机组及发电机运行时, 由于水輪机的某些出力能适应于不同的轉速, 則就不能使系統內的負荷分配达到稳定和合理。为此, 水輪发电机组必須进行調节。仍以上述为例, 則在此时要关小导水机构的开度, 使得其轉

速由 n'_2 下降，在发电机静态特性及水轮静态特性双重作用的影响下，使得新的稳定工作规范点变为“O'”点，此时的转速为 n' ，出力为 N_2 ，是完全被控制在允许的范围內，且经济效用也是很高。如把O'看成是在新的开度下，水轮机静态特性曲线 A_1B_1 及发电机静态特性曲线 C_1D_1 的交点，同样的可以有 A_2B_2 和 C_2D_2 的交点“O''”。我们把这些通过调节后的稳定工作点O'、O、O''连成一曲线时（见图1-6上的O'OO''曲线），这根曲线即为调速器静态特性曲线。该曲线的方程式仍为 $I \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_c$ ，但它已经是经过调节后的水轮发电机组的运动方程式。为了应用便利起见，调速器静态特性曲线的座标不是以 $M = f(\omega)$ 来表示，而是用 $N = f(n)$ 来表达（见图1-8）。该曲线的斜率在水轮机调节中以一个专门名词即残留不均匀度 δ_{ocm} 来表示^①，其大小等于：

$$\delta_{ocm} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_M} \%$$

式中 n_{max} ——水轮发电机组在空运转时的最大转速；
 n_{min} ——水轮发电机组在担负最大出力下的最小转速；
 n_M ——水轮发电机的正常转速。

δ_{ocm} 的物理意义即表示着水轮发电机组在发生负荷变化时，经过调节后相对于额定转速（原有转速）的转速增减率。

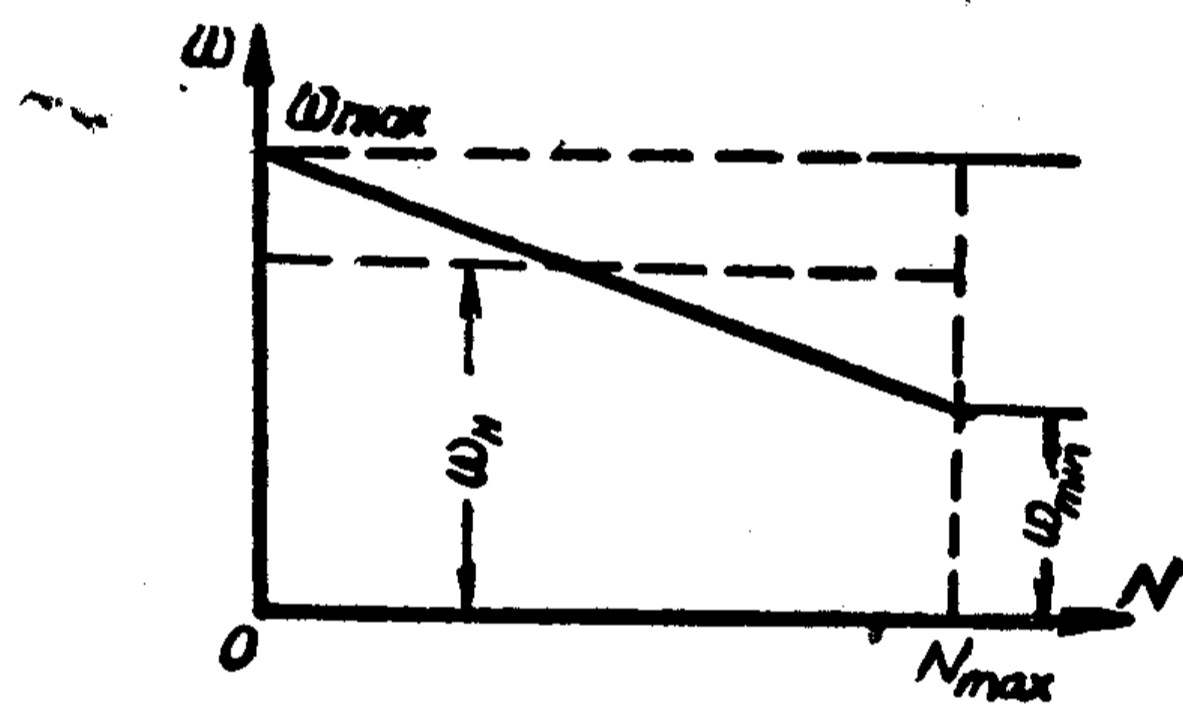


图1-8 调速器静态特性曲线。

δ_{ocm} 是鉴别调节质量的一个重要标志，但是 δ_{ocm} 的大小来判断调节质量的优劣，往往会走向事物的反面。在判断调节质量时，必须自水轮发电机组运行特性、本身的特性等方面作整体的全面的分析。一般说来， δ_{ocm} 过大对于调节质量不利的，它会使得调节过程不稳定或者使调节时间持续。近代调速器的 δ_{ocm} 一般在0~8%的范围內。

① 严格地说 δ_{ocm} 不是调速器静态特性曲线的斜率。

第二章 水輪機調速系統原理圖

§ 2-1 水輪機調速系統原理的概論

實現水輪發電機組任務的主要途徑，是借調速器來維持或按照給定的條件改變水輪發電機組的轉速的過程。要達到此一目的的手段可以是多種多樣，並且是隨着生產不斷的發展、技術水平不斷的提高、所應用的辦法也是在日益完善的。但不論其是古代的調速器或是近代的調速器，在調速原理方面具有着共同的規律。所不同的僅是它們的特殊性而已。

水輪發電機組的穩定工作規範——轉速保持穩定的要求，常因外界負荷的改變而遭到破壞。調節學上把此種外界負荷的改變統稱為擾動。無論這些擾動的本質怎樣，它們對過程有害的作用應當由調速器相應的控制作用來抵消。為了維持轉速的恒定，可以測量外界的擾動，並依靠這些量度來對水輪發電機組發生作用。這種使轉速的穩定方法就叫做自動補償。但同一水輪發電機組的擾動來源可能是形形色色的，顯然，自動補償方法就不實用。何況所有可能擾動的來源決不是永遠能夠預料得到的。所以在許多情況下，控制一個過程只靠自動補償的方法，一般是不可能的。

為了維持轉速的恒定（或其轉速的波動不超過允許偏差範圍），往往不是去測量各種各樣的干擾，而只限於測量所必須調整的轉速和正常轉速的偏差，並依靠這種偏差去作用水輪發電機組。這樣組成的控制水輪發電機組的系統，不論有多少種不同的擾動，只要一個測量儀器就可以了。當然，被測量的量這時不可能保持絕對的準確，因為只有被測量的量

和所需的值發生偏差時才對水輪發電機組發生作用。由於這個緣故，為了使被測量的量和所需值之間偏差很小時，也能對機器起足夠的補償作用，所以重要的是能夠對一些很小的量有所反應。根據這個原則建立起來的調速系統原理圖如圖 2-1 所示。

水輪發電機組和實現自動調節過程的調速器就叫做調節對象。調節對象受到調速器作用的那一部分叫做調整機構（如水輪機中的導水機構或工作輪葉片的轉動機構等）。受調整的量叫做被調整量或被調整參數。

為了能對調整機構產生作用，調速器應裝有被調整參數和給定值之間偏差裝置和確定被調整量給定值的裝置，前者叫做感受元件，後者叫做給定裝置。

當被調整量和給定值有偏差時，如調速器的感受元件所產生的力和能量能使調整機構以所需的速度移動時，這時就把感受元件和調整機構直接相聯接這樣的調整器叫做直接作用式調速器。如果調速器的感受元件所產生的力和能量不足以使調整機構以所需的速度移動的話，此時就在感受元件和調整機構之間設置有放大器，感受元件在這裡僅用來作為命

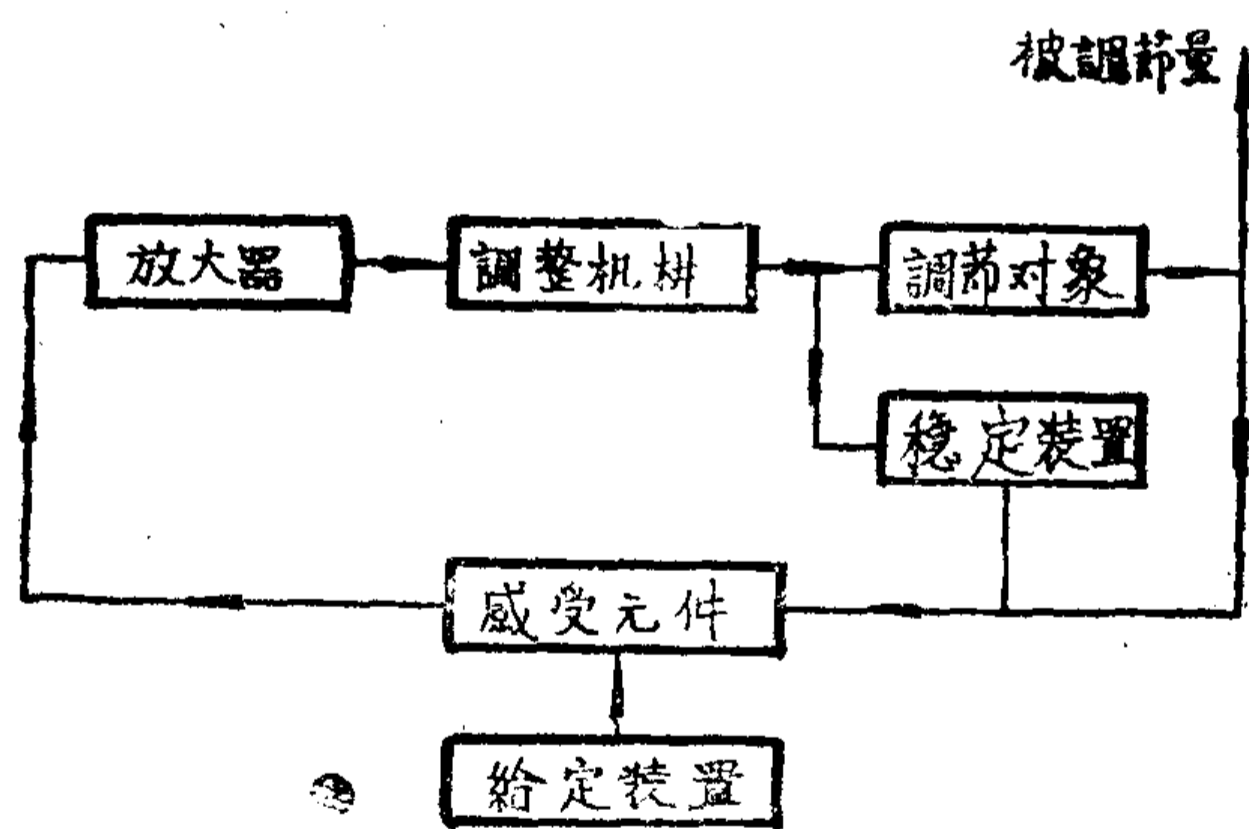


圖 2-1 水輪發電機組調速系統原理圖。

令装置。从感受元件发出的信号控制放大器(液压的, 气动的, 电气的, 电机的等等), 这种放大器依靠了外来的能量产生足以控制执行装置的力和功率。所谓执行装置即是直接和调整机构联在一起, 并驱使它运动的装置。作为执行装置的有各种电动机, 液压的和气动的拖动装置等等。装有这种放大器的调速器叫做间接作用式调速器。

因为水轮发电机组的工作质量决定于调速器, 所以在设计调速器时必须使调整过程的进行能满足一系列严格的技术要求, 调速器通常也具有使过程振荡和稳定性破坏的倾向, 这应当在设计和调整调速器的过程中加以克服。为了保证调整的稳定性, 同时为了减弱满足技术任务对调整过程所提出的很高而必须具备的条件, 我们加进了专为达到这个目的用的各种装置。作为这种装置的有: 各种反馈、导数作用、积分作用、加快作用以及故意引入的延滞或开断作用回路等等, 所有这类装置称为稳定装置。以上的装置都是组成间接式调速器的调速系统的必要装置。

§ 2-2 直接作用式调速系统原理图

组成直接作用式的调速系统图的装置和元件有:

(一) 感受元件或称测频元件——此机构用来感受水轮发电机组的角速度偏离已知值之差, 并对调整机构或调速系统中的单独元件(即是间接作用式调速系统原理图内的放大器)给予相应的动作或命令, 图 2-2 内的离心摆 1 即是感受元件中的一种。

(二) 调整机构——此机构直接用来改变作用于水轮机工作轮上的水力矩的大小, 如图 2-2 内的节流门 2 (或包括控制机构的导水机构)。

(三) 执行装置——这种装置是实现感受元件和调整机构之间的操作机构, 使调整机构随即移于感受元件所示的位置, 如图 2-2 内的连杆 AOB 。

(四) 给定装置——这种装置是用来确定被调整量给定值, 即如图 2-2 内驱动离心摆的原动机械。这种原动机械可以是:

- (1) 由水轮发电机组主轴通过机械传动(齿轮或皮带传动)直接驱动离心摆。
- (2) 由水轮发电机组主轴通过液力传动(油泵与油轮机的组合)直接驱动, 类似离心摆作用的液压摆。
- (3) 由水轮发电机组主轴通过电气传动(永磁发电机和同步电动机的组合)直接驱动离心摆。

目前用得最广泛的是最好一种, 因为这种给定装置非常简便。

调速系统原理图中的感受元件的工作好坏, 将对于水轮发电机组调节质量起着决定性

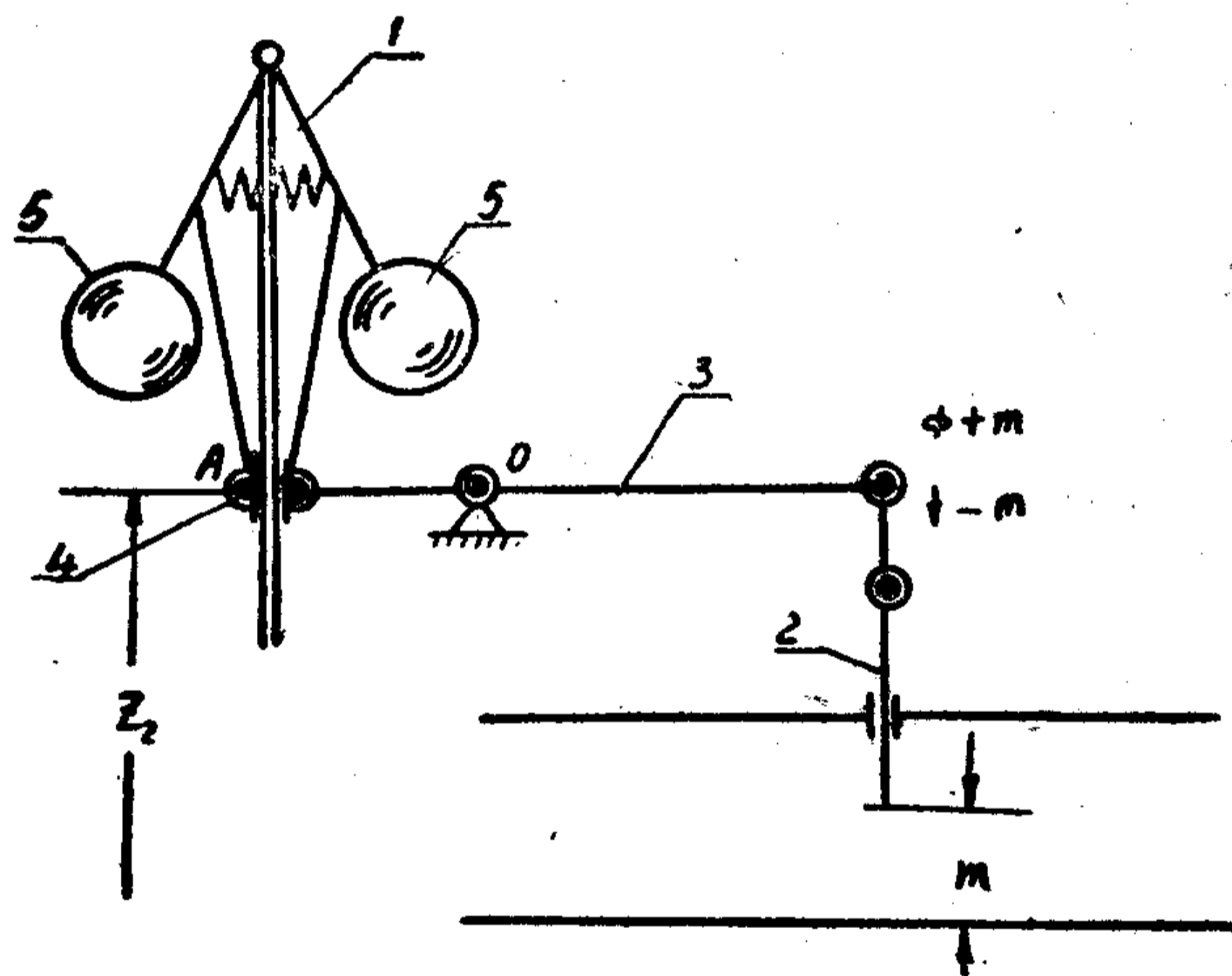


图2-2 直接作用式调速系统原理图。

作用。因此在未分析直接作用式調速系統原理圖以前，對圖 2-2 內離心擺 1 的工作原理及其動作，加以敘述。

離心擺是由飛球（又稱重錘）、滑塊、連杆及彈簧等零件組成。它的轉動是由水輪發電機組主軸通過傳動裝置來保證的，故

$$\omega_M \textcircled{1} = i\omega \quad (2-1)$$

式中 ω_M ——離心擺角速度；

ω ——水輪發電機組的角速度；

i ——傳動比數。

當水輪發電機組處在穩定工作規範運轉時，即以轉速 v （或 ω ）為恒定值作均勻旋轉時，離心擺則按 $\omega_M = \text{常數}$ 運轉。作用於飛球上的離心力有使飛球向外逸出的趨勢，而彈簧的拉力及滑塊的阻力有阻止飛球向外逸迫使它向心的運動。這樣作用的結果，必然的使得飛球處於某固定軌跡上運動，即以一定的半徑作圓周運動。位置由飛球所決定的滑塊，也只有在一一定的位置上進行旋轉。因此滑塊的每個位置，都反映着不同的轉速。當甩負荷時，由於水輪發電機組的轉速要升高，此時作用於飛球上的離心力亦將隨之增大。其結果使得飛球脫離原有軌跡而向外飛逸，但它不會無限的逸出。當飛球在向外逸出的同時，必然會引起彈簧的伸長，這就使得彈簧回復能力增強。如此作用的結果，就迫使飛球在新的軌跡上轉動。由飛球所決定的滑塊位置，在此時亦由原有的 z_0 位置升高到 z'_1 的位置（參見圖 2-3 a 及 2-3 b）。同樣的原理，在增負荷時，滑塊將由原有的 z_0 下降到 z''_1 的位置。如若以圖形來表示 ω_M （或用 n_M ）與滑塊的關係時，則其曲線如圖 2-3 b 所示。

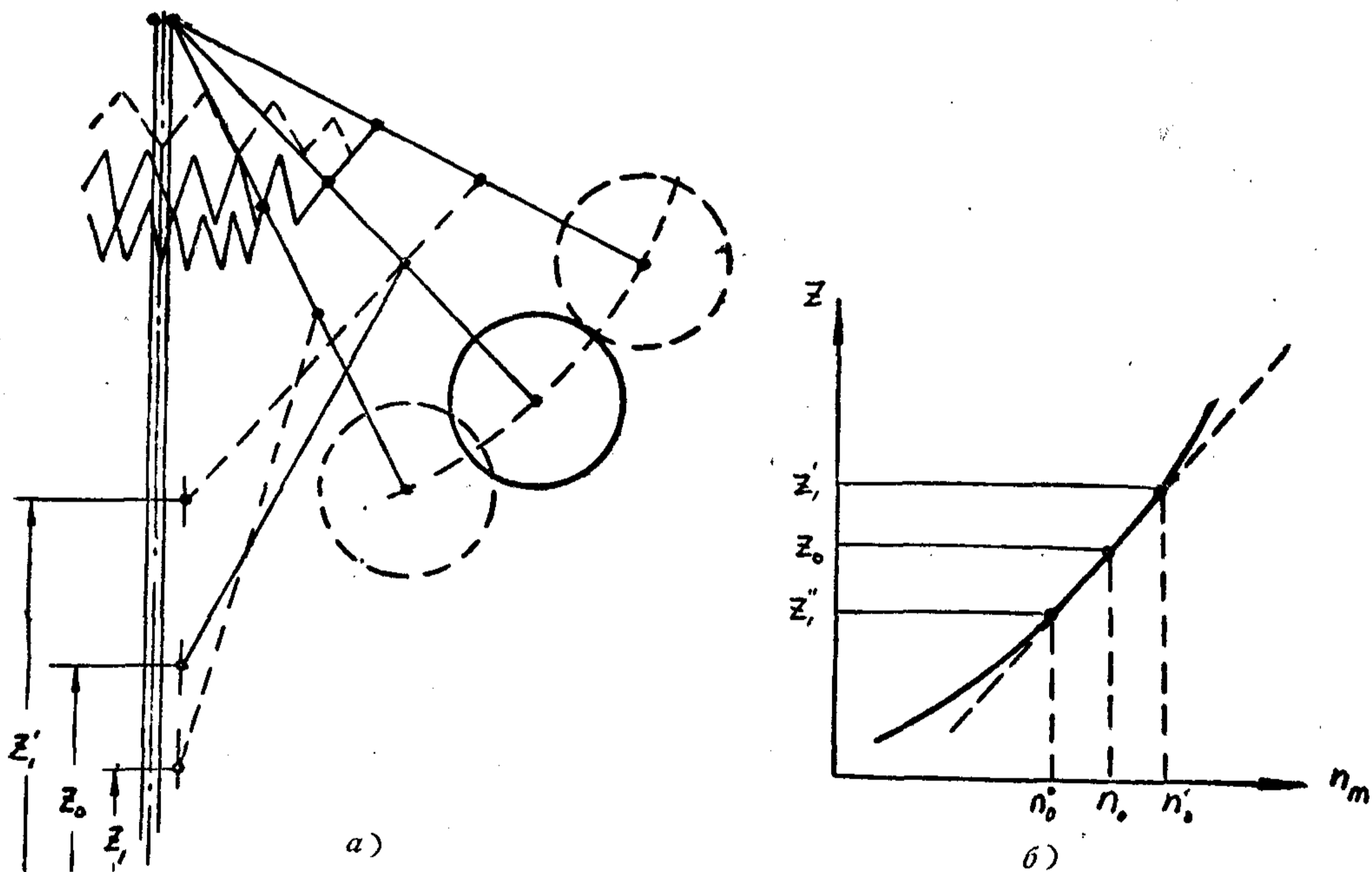


圖 2-3

a—離心擺動作示意圖； b—離心擺轉速與滑塊位置的關係曲線。

① 帶有注腳 M 的即表示離心擺意思。

关于曲线 $n_M = f(z)$ 的绘制和分析，还将在本书的第四章内进行详细的讨论。由于在水轮发电机组调节中，转速的允许波动范围很小，因此由转速所决定的滑块位移也就不大。我们完全可以把它的位移控制在 $h = z_1' - z_1''$ 的范围内（ h ——滑块的全行程），并采用线性变化的规律来取代实际上是非线性变化规律的 $z = f(n_M)$ 。由于 h 本身就很小，则所造成的误差是不大的。在实际中应用线性变化规律的 $z = f(n_M)$ 来设计及调整离心摆，与运转记录是近似的。这样就大大的简化了各种调速系统原理图的研究和分析。

为了便于分析各类调速系统调节过程（即被调整参数随时间的变化过程）及区别各类调速系统原理图的特点，我们应用了图解分析法进行阐述。

若水轮发电机组在 t_1 时刻内是处于稳定工作范围点运行，即此时的动力矩与水力矩相等（参见图 2-4 c 上的点“1”）：

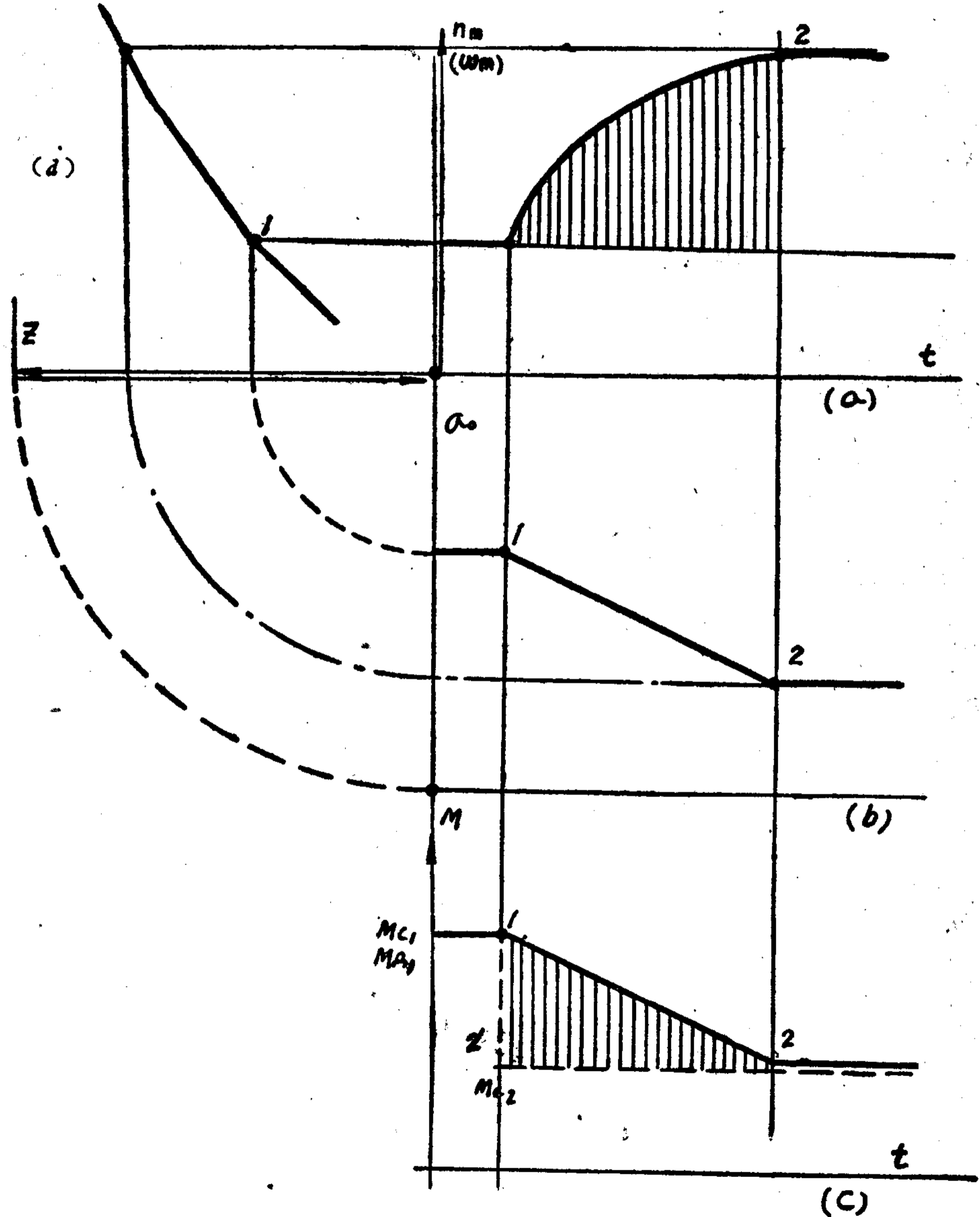


图2-4 直接作用式调速系统原理图的图解分析。

$$M_{\theta} = M_{\theta_1} \quad M_c = M_{c_1}$$

$$M_{\theta_1} = M_{c_1}$$

离心摆的 $\omega_M (n_M)$ (参见图 2-4, a 上的点“1”) 与水轮发电机组的 $\omega (n)$ 保持不变, 与 ω_M 相应的滑块位置为 z_1 (参见图 2-4, d 上的点“1”)。离心摆通过滑块 A 点与连杆 AOB 和调整机构相连, 并使得节流门的开度 a_0 保持不变 (参见图 2-4, b 上的点“1”)。若在 t_1 的某瞬间发生突然的甩负荷, 即由原先的 M_{c_1} 下降为 M_{c_2} (参见图 2-4, c 上的点“2'”), 且在以后的 $t_1 - t_2$ 时刻内始终保持着 M_{c_2} 的大小。由于调整机构的动作是当转速发生偏差时才开始, 而负荷的变化又是发生在某一瞬间, 其结果必然引起能量的不平衡。当甩负荷时就产生了能量的过剩, 加快了水轮发电机组的速度, 使离心摆的转速 n_M 沿着 1—2 曲线而不是直线上升。这是考虑到水锤影响的原因 (将于调节保证率章节内作详细讨论)。由转速所决定的滑块的位置, 亦随着前者的上升而沿着 $z = f(\omega_M)$ 的 1—2 直线向上移动。而 B 点是通过连杆 AOB 与滑块 A 点相连的, 当 A 点在向上移动时, B 点则向下移动。结果使节流门的开度沿着 1—2 ($a = f(t)$) 直线变化而关小, 随之作用于工作轮上的水力矩亦沿着 1—2 ($M_1 = f(t)$) 的直线减小。这种顺次的动作, 只有在新的水力矩与甩负荷后的阻力矩相等时, 即 $M_{\theta_2} = M_{c_2}$ 时, 才会告终 (参见图 2-4 a、b、c、d 上的点“2”)。由上述的分析可以看出这类调速系统原理图的特点:

(1) 在负荷发生变化后, 虽则水轮发电机组是经过了调节, 但其转速已经不能保持原有的转速。在甩负荷时其转速要比原有转速高, 在增负荷时则相反。这种转速的最大偏离值 Δn_{\max} 可达到 10~12%。

(2) 工作不稳定。这是由于滑块的惯性所造成的。关于它的不稳定性, 将在第四章内再作详细的分析。

(3) 这类调速系统原理图仅适用于中小型调速器。当牵引力矩 (或称离心摆能量) 超过 100 公斤-米时, 就会使得调速器不经济和不灵敏。

(4) 结构简单, 维护方便。

因而这类调速系统原理图可以适用于对电能质量要求不高的场合下, 如农村的照明及驱动农业生产机械。

但必须注意到, 在突然全部甩负荷时的电气设备及机械设备的事故保护, 如采用水电阻等措施。

对于这类调速系统原理图的调整机构的平衡图即如图 2-5 所示, 图中, m 表示节流门行程, h 为滑块的全行程。

§ 2-3 不带有硬反馈装置的间接作用式调速系统原理图

间接作用式调速系统原理的出现, 是基于生产有了不断的发展, 用电比起过去有了进一步的要求, 人们利用水力资源的技术水平亦有了极大的提高, 水电站的容量和水轮发电机组的容量都有了显著的提高, 如仍采用直接作用式调速系统原理来设计并制造调速器,

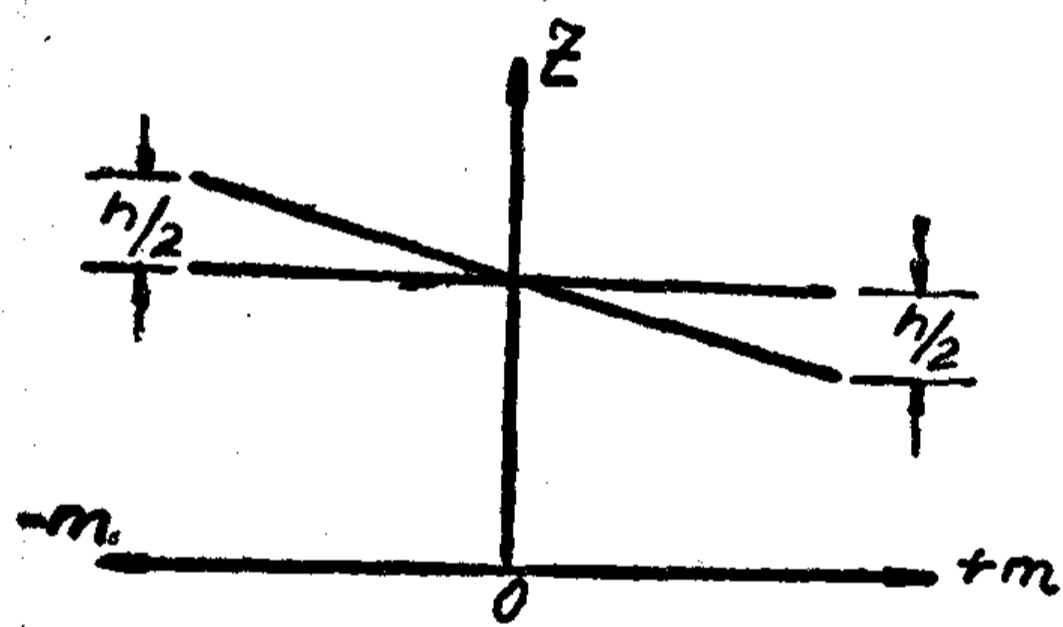


图2-5 直接作用式调速系统调整机构平衡图。

质量要求不高的场合下, 如农村的照明及驱动农业生产机械。

但必须注意到, 在突然全部甩负荷时的电气设备及机械设备的事故保护, 如采用水电阻等措施。

对于这类调速系统原理图的调整机构的平衡图即如图 2-5 所示, 图中, m 表示节流门行程, h 为滑块的全行程。

§ 2-3 不带有硬反馈装置的间接作用式调速系统原理图

间接作用式调速系统原理的出现, 是基于生产有了不断的发展, 用电比起过去有了进一步的要求, 人们利用水力资源的技术水平亦有了极大的提高, 水电站的容量和水轮发电机组的容量都有了显著的提高, 如仍采用直接作用式调速系统原理来设计并制造调速器,