# 第4章　水轮发电机组频率和功率的自动控制

1. 概述
2. 频率和有功功率自动调节的方法
3. 自动发电控制（AGC）

## 4.1 概述

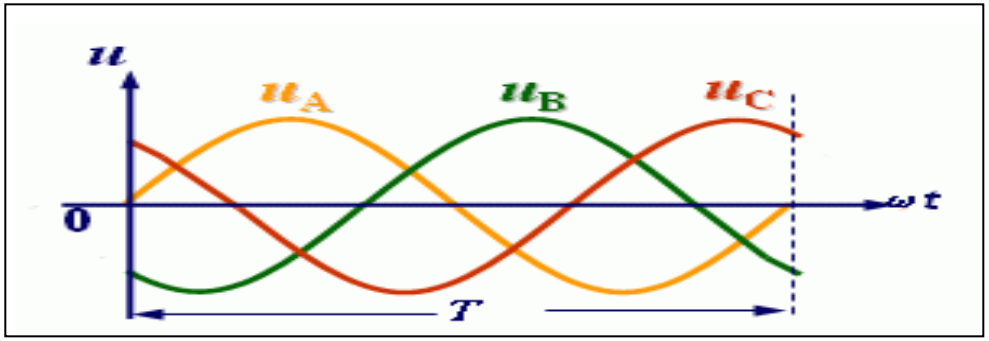
### 1、电力系统的功率平衡与频率稳定

电力系统的频率是指电力系统中同步发电机产生的正弦交流电压的频率，是电力系统运行参数中最重要的参数之一。在稳态运行条件下，所有发电机同步运行，整个电力系统的频率是相等的。并列运行的每一台发电机的转速与频率之间的关系为

$$f = pn/60$$

式中 $p$为发电机转子的极对数；$n$为发电机的转速，r/min；

$f$为发电机定子电压的频率，$Hz$。



电力系统的频率稳定与否，取决于系统的有功功率是否平衡：

- 若系统总的发电功率等于用户总的耗用功率（包括厂用电和线路耗损），则系统的频率维持在额定值；
- 若系统总的发电功率大于（或小于）用户总耗用功率，则系统的频率大于（或小于）额定值；

由此可见，系统频率的变化是由于发电机的负荷功率与原动机输出功率之间失去平衡所致，因此调频与发电机的有功功率控制是分不开的。

但电力系统的负荷是不断变化的，而原动机输入功率的改变则较缓慢，因此系统中频率的波动是难免的。

并网运行发电机组的功率控制，就是维持电力系统功率的平衡，使系统的频率偏差在容许的范围内。

## 如何有效控制?

改变负荷功率？
改变输出功率？



水轮发电机组基本运动方程（角动量定理）：

$$J\frac{d\omega}{dt}=M_h-M_g$$

式中，$J$为转动惯量，$\omega$为角速度，$M$为力矩，其中一个为水力作用对水轮机转子的作用力矩（驱动力矩$M_h$），另一个为发电机定子对转子的电磁作用力矩（制动力矩$M_g$）。机组运行过程中，可能遇到的三种情况：

① $M_h=M_g\rightarrow\frac{d\omega}{dt}=0\rightarrow\omega=\text{const}\rightarrow n=\text{const}$ 机组转速稳定（负荷不变）

② $M_h>M_g\rightarrow\frac{d\omega}{dt}>0$ 机组加速运转（负荷减小）

③ $M_h<M_g\rightarrow\frac{d\omega}{dt}<0$ 机组减速运转（负荷增大）

① $M_h = M_g \rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0$ 机组转速稳定（负荷不变）

② $M_h > M_g \rightarrow \frac{d\omega}{dt} > 0$ 机组加速运转（负荷减小）

③ $M_h < M_g \rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0$ 机组减速运转（负荷增大）

改变$M_h$、$M_g$使得两者平衡 ⇒ $M_g$与负荷相关，$M_h$如何改变？

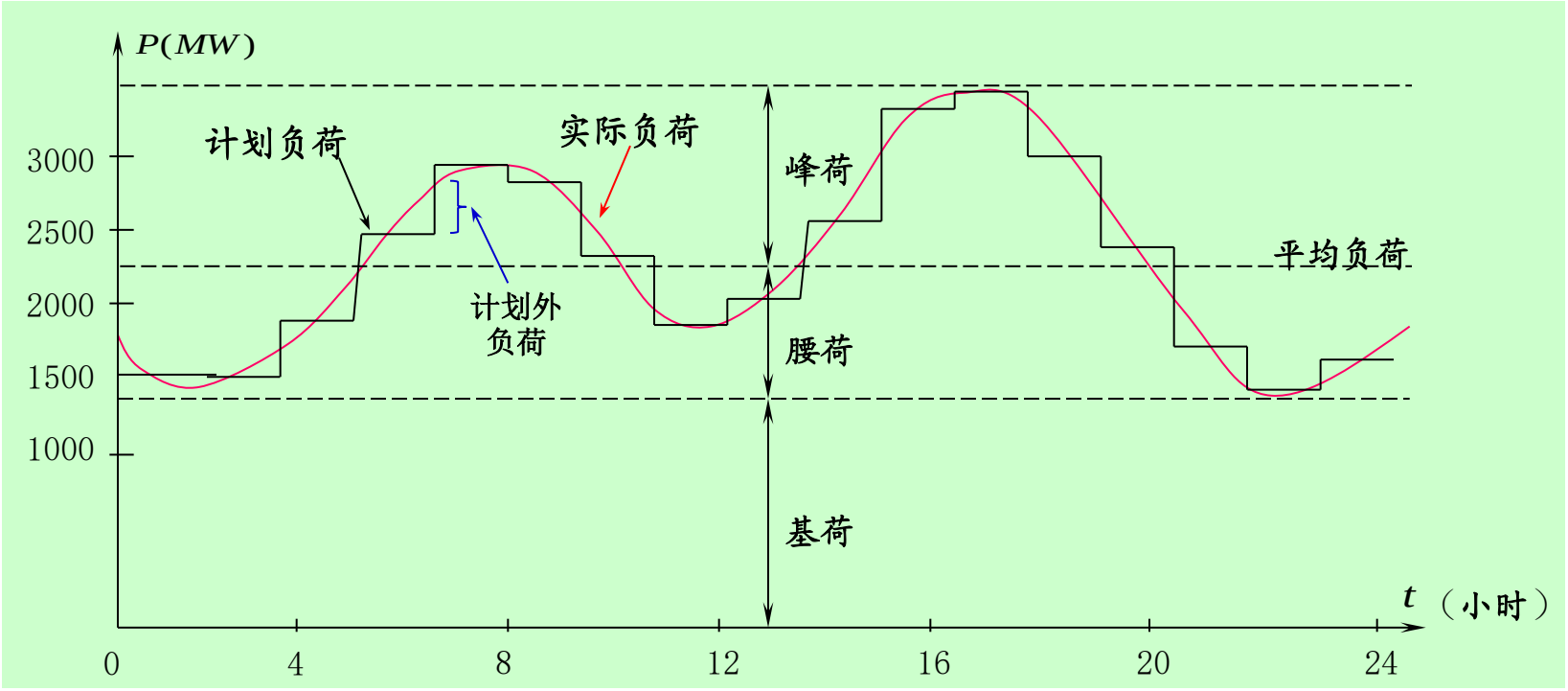
$$N = M\omega = 9.81\eta QH \Rightarrow M = \frac{9.81\eta QH}{\omega}$$

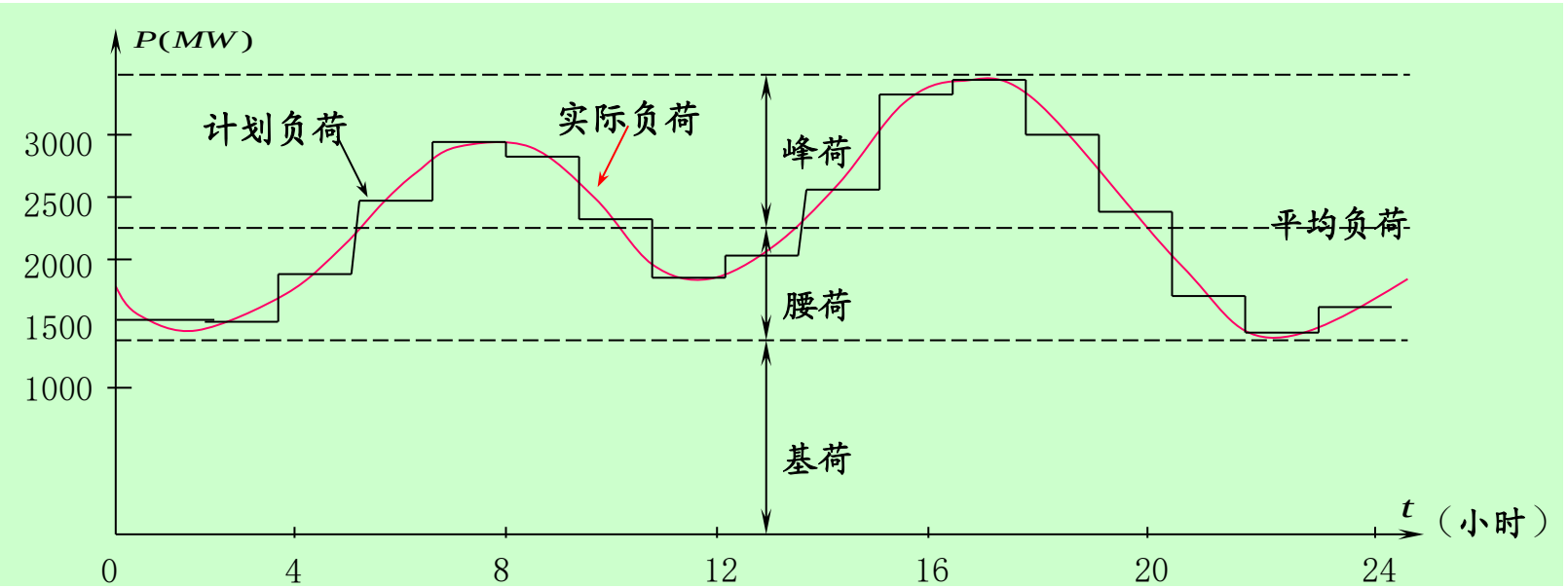
从理论上讲，改变$\eta$、$Q$、$H$、$\omega$中之一，都可改变$M$。但$\omega$为被调节量，改变$\eta$不经济，改变$H$不现实（短时间内基本不变），因此只能改变$Q$来改变$M$，即通过导水机构的开度改变$M$ 。即对水电站而言，要通过改变导水机构的开度，调节发电流量大小，改变出力，以解决频率波动。这就是水轮机调速器的控制方法和基本原理。

## 2、电力系统的日负荷

前面说到，系统中频率的波动是难免的，其原因之一是电力系统的负荷是不断变化的。那么电力系统的负荷是如何不断变化的？

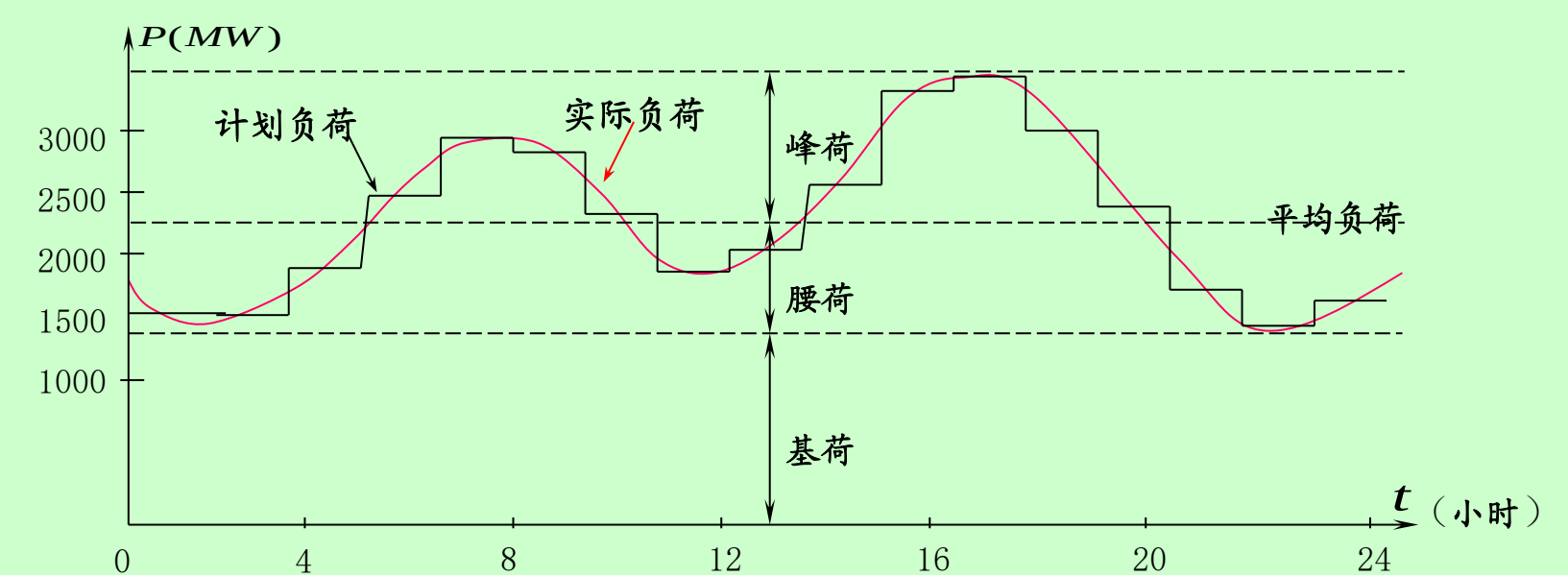
电力调度中心根据统计资料来制定系统日负荷曲线，如下图所示。图中，黑线为计划负荷，红线为实际负荷，其差值为计划外负荷。



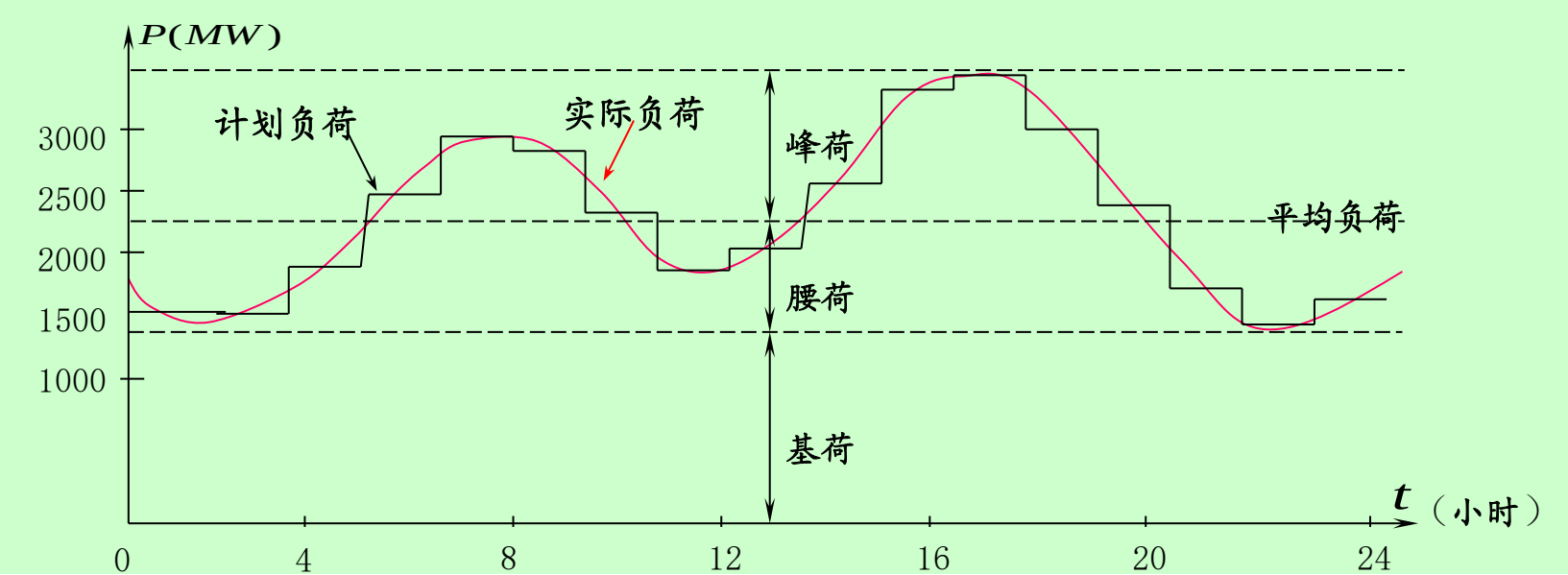



从电力系统运行的实际情况来分析，系统负荷的变化主要可以分为两种类型：一种是有规律的变化，另一种是无规律的变化。

在一天之内，电力系统的负荷是有规律地变化的，一般有两三个高峰，例如早上八点左右和晚上七、八点左右；在高峰之间是相应的低谷，一般在晚上十点至第二天凌晨期间可能出现最低负荷。电力系统的日负荷曲线基本是按这种有规律的负荷来拟定的，最高负荷与最低负荷之间的差额，则随具体系统的情况而异，一般可达最大负荷的25%~50%左右。




电力系统中无规律变化的负荷，是由于某些生产设备（例如大型水泵电动机、电气机车等）的启停而引起的，一般而言，这些设备的启停是没有规律的，这种无规律负荷的变化范围，通常在电力系统中所占的比例不大，一般不超过系统最大容量的2%左右，且系统容量越大，所占比例越小。




不管是有规律的负荷变化还是无规律的负荷变化，都会引起电力系统频率或多或少的波动，而频率的波动将对用户产生直接的影响。因此，电力系统的频率波动必须控制在一定范围内，以确保系统用户的工作条件和系统运行安全。

## 3、调频机组与调频电站

由于计划外负荷是随机变化的，因此必须采取必要的技术手段，将电力系统的频率维持在正常水平。这就要求在系统中划出一部分机组甚至几个水电站执行调频任务，使系统的总发电功率随时跟踪用户的总耗用功率，这些机组或电站称为调频机组或调频电站。调频容量的大小取决于系统在10分钟内最大负荷上升的速度和系统频率的允许偏差值，一般约为系统最大负荷的8~10%。

对调频机组功率控制的要求是：

- 维持系统频率在50±0.2Hz/s；
- 能够防止输电线路过负荷运行；
- 保证有一部分机组有旋转备用容量；
- 能够在调频机组和电站间实现有功功率的优化分配。

在大容量电力系统中，由于需要的调频容量较大，对调频的要求比较高，故参与调频的机组往往不是一台，而是多台，甚至可能有几个电站的机组参与调频。而系统中的发电机组是多种多样的，通常有火电机组，又有水电机组，甚至还有核电风电等，这些机组的型号、容量、性能是各不相同的，所以，它们在承担固定负荷时存在一个有功功率的最优分配问题，即在调频的同时，又要在调频机组间实现有功功率的最优分配。

什么是机组间有功功率的最优分配呢？

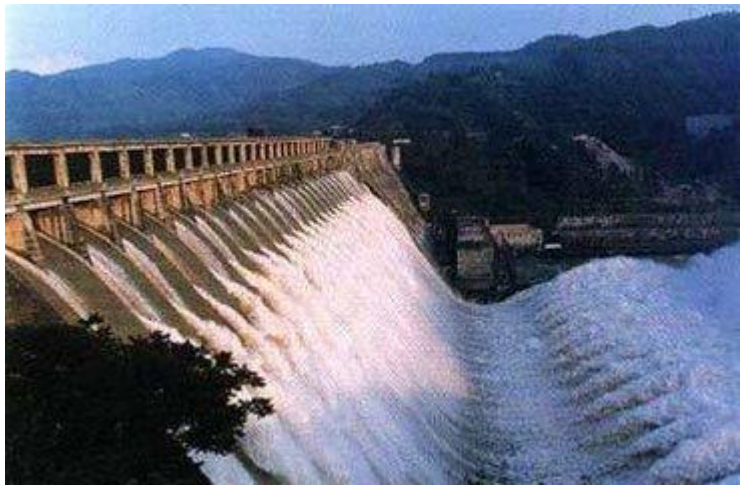
## 4、运行机组间负荷优化分配原则

基本原则：

- 满足电力系统的功率平衡；
- 避开机组的非安全运行区（机组震动区）运行；
- 实现运行机组间的负荷优化分配，使系统的总发电费用最少。

在完全由水电站组成的系统中，运行机组间负荷优化分配是指水能消耗最少的方案。对于有调节库容的水电站来说，是将电网调度按时段（一般是1h、0.5h或者15min）给定的电站日负荷，分配到各台机组，来确定机组间负荷的优化分配和机组合理的启、停次序，从而在满足各种约束条件下，使全厂的发电耗水最小（“以电定水”）。





在由水、火电站组成的混合系统中，运行机组间负荷优化分配是指：在来水量一定的条件下，根据水库的调节性能和给定的负荷出力，进行水、火电机组间有功功率的分配，使系统总费用最少的方案。





安康发电公司效果图

运行机组间负荷优化分配问题（水电系统）的数学模型为：

目标函数 $$MinQ = \sum_{j=1}^{m} Q_j(P_j, H)$$

$m$ – 电站机组台数；

$H_j$ – 第$j$台机组的水头；

$P_j$ – 第$j$台机组的出力；

$Q_j$ – 第$j$台机组的流量；

$S_j$ – 第$j$台机组的稳定运行区域。

约束条件 $$\begin{cases} P(k) = \sum_{j=1}^{m} P_j(k) \\ P_j(k) \in S_j \end{cases}$$

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t - S_t)\Delta t$$

$$Q_{\min,t} \le Q_t \le Q_{\max,t}; \quad |Q_t - Q_{t-1}| \le \Delta Q$$

$$V_{\min,t} \le V_t \le V_{\max,t}; \quad |V_t - V_{t-1}| \le \Delta V$$

该模型的求解可采用：等微增率法、动态规划法等常规算法和遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，这些算法有各自的特点，应根据问题的规模、计算速度要求、约束条件等，选择其中一种，或综合几种方法应用。

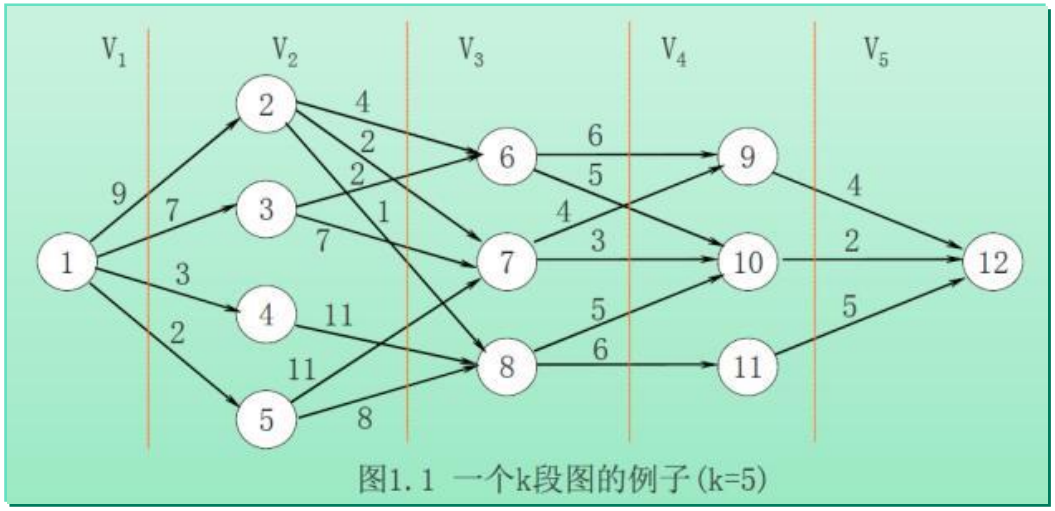


图1.1 一个k段图的例子(k=5)

- 在每一次迭代过程中，粒子通过个体极值和群体极值更新自身的速度和位置，更新公式 如下：

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^{k} + c_1 r_1 (P_{id}^{k} - X_{id}^{k}) + c_2 r_2 (P_{gd}^{k} - X_{id}^{k})$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^{k} + V_{id}^{k+1}$$

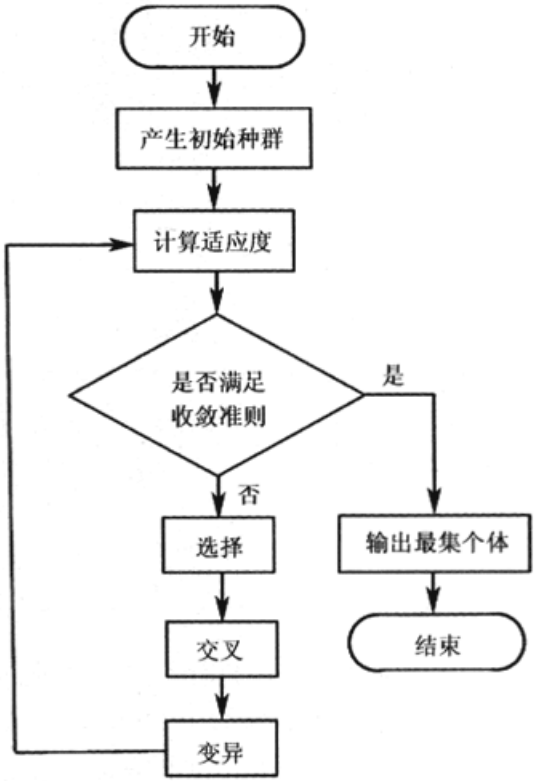
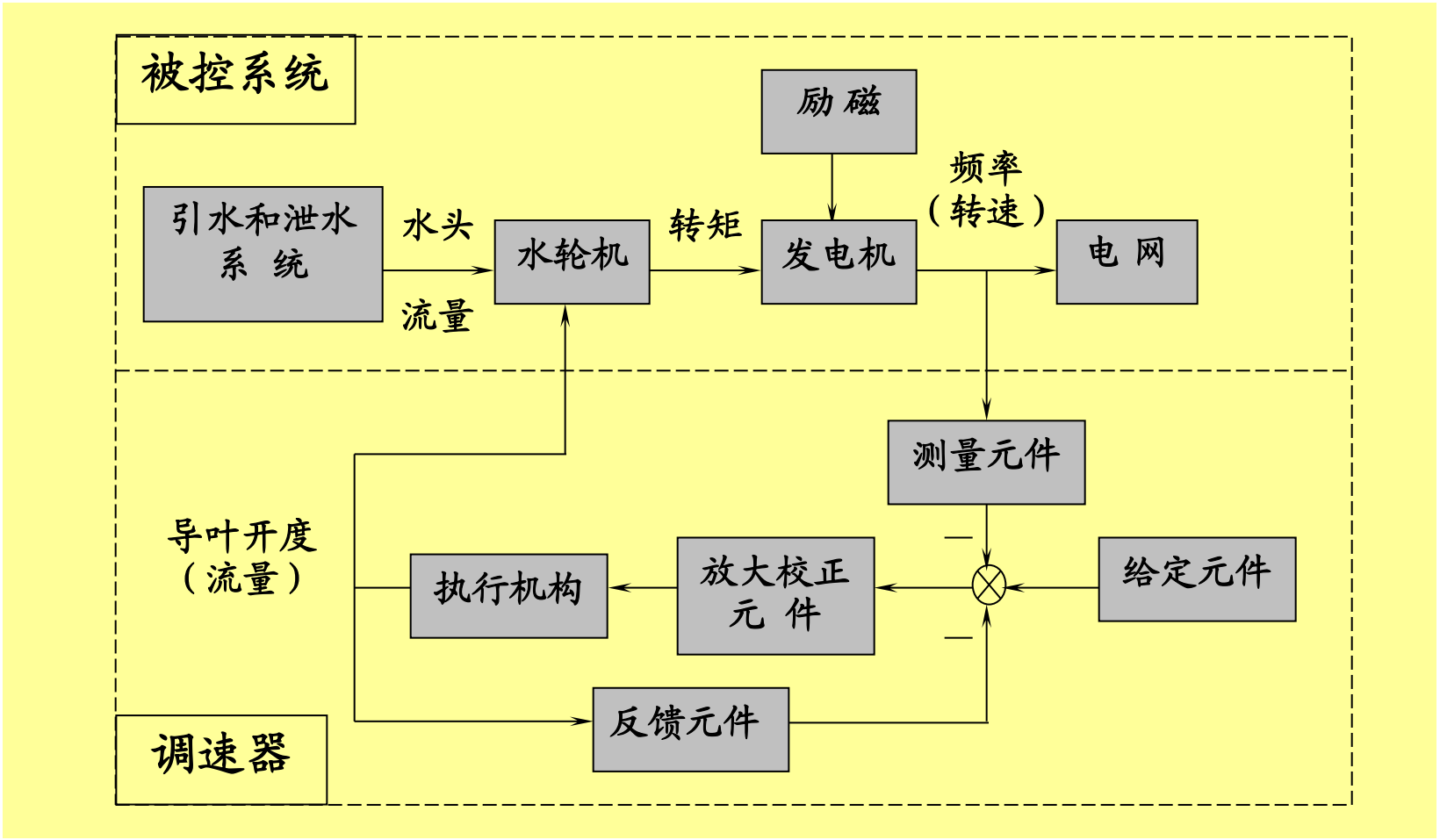


图1 遗传算法流程图

## 4.2　频率和有功功率自动调节的方法

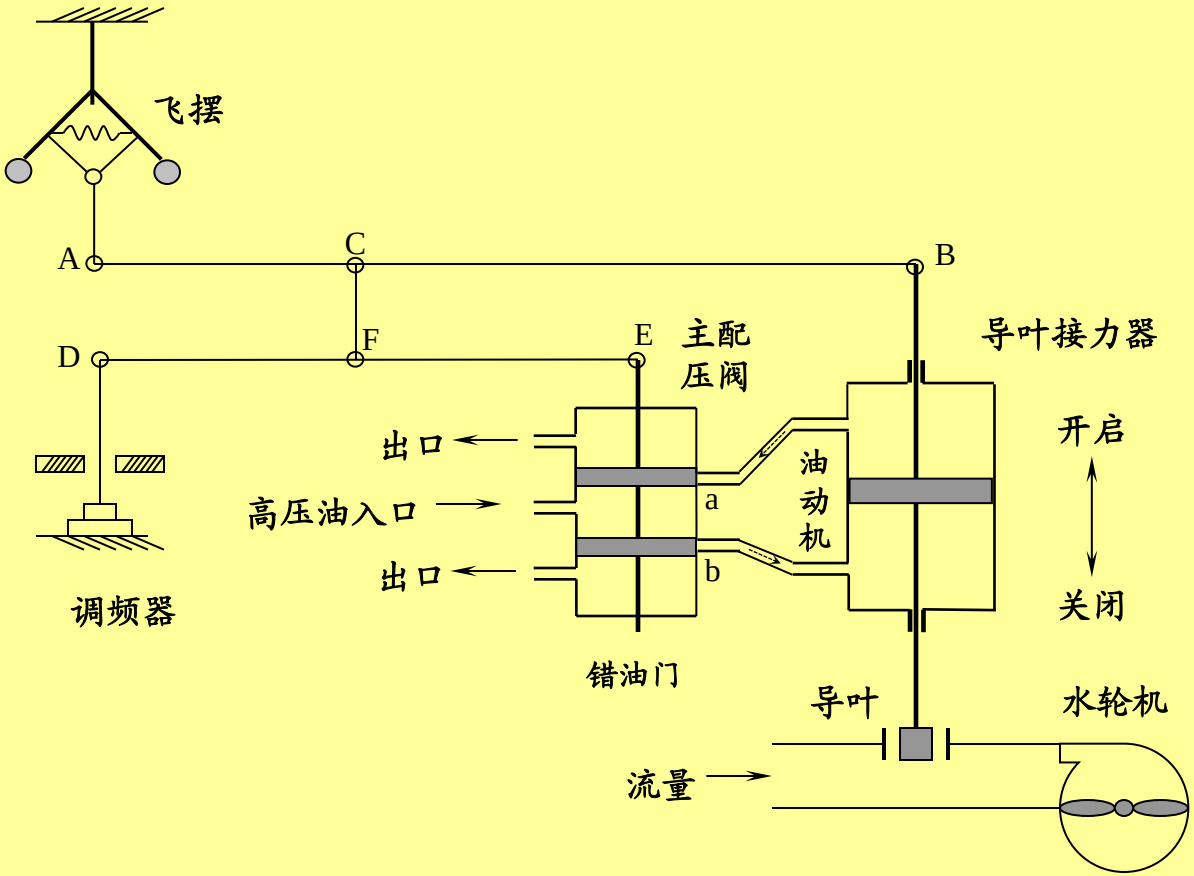
### 1、水轮发电机组的调速系统

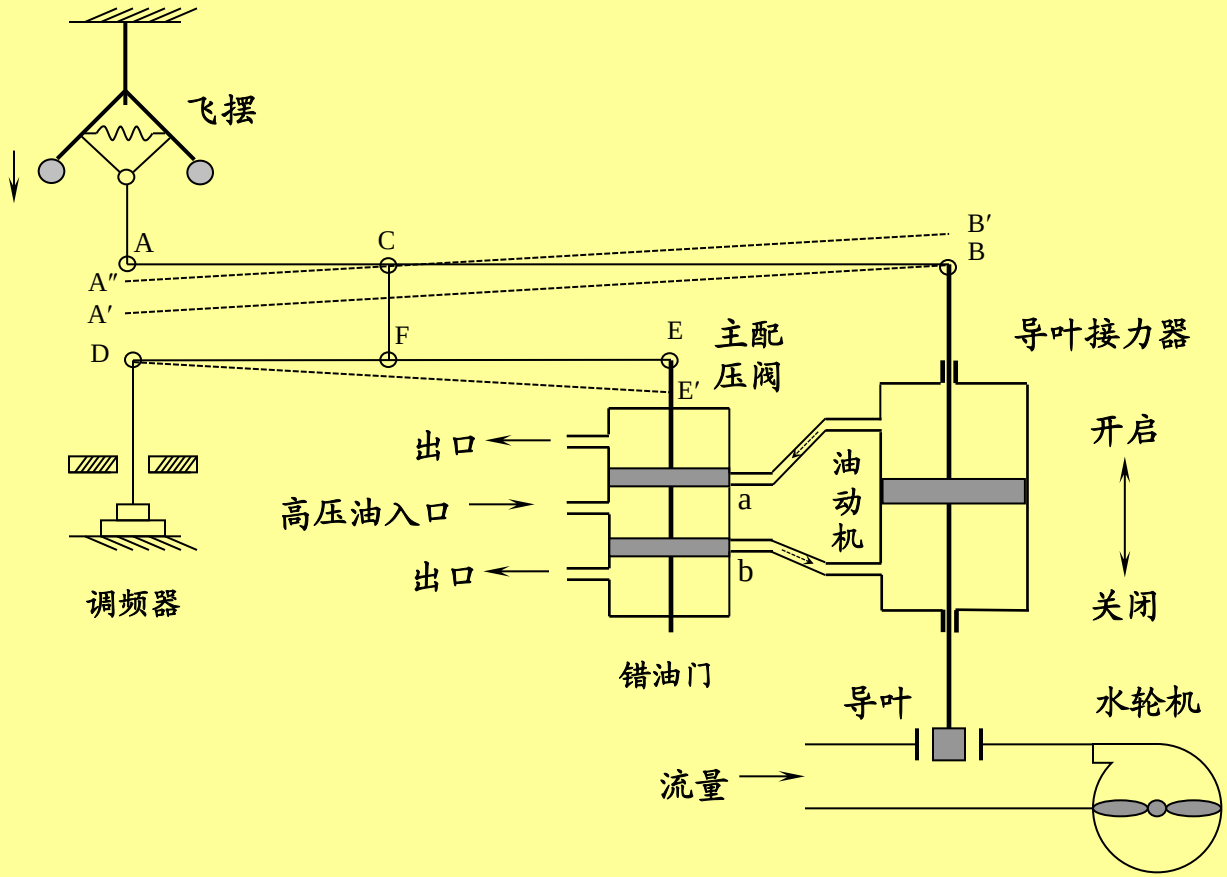
水轮发电机组转速的调整是由水轮机调速系统来实现的，当系统有功功率平衡遭到破坏，引起频率变化时，原动机的调速系统将自动改变原动机的进水（汽）量，相应增加或减少发电机的出力，以适应负荷的需要。因此，发电机的功率-频率特性取决于调速系统的特性。水轮机调速系统的原理图如下：


被控系统
励 磁
频率
（转速）
引水和泄水
系 统
水头
流量
水轮机
转矩
发电机
电 网
测量元件
导叶开度
（流量）
执行机构
放大校正
元 件
给定元件
反馈元件
调速器

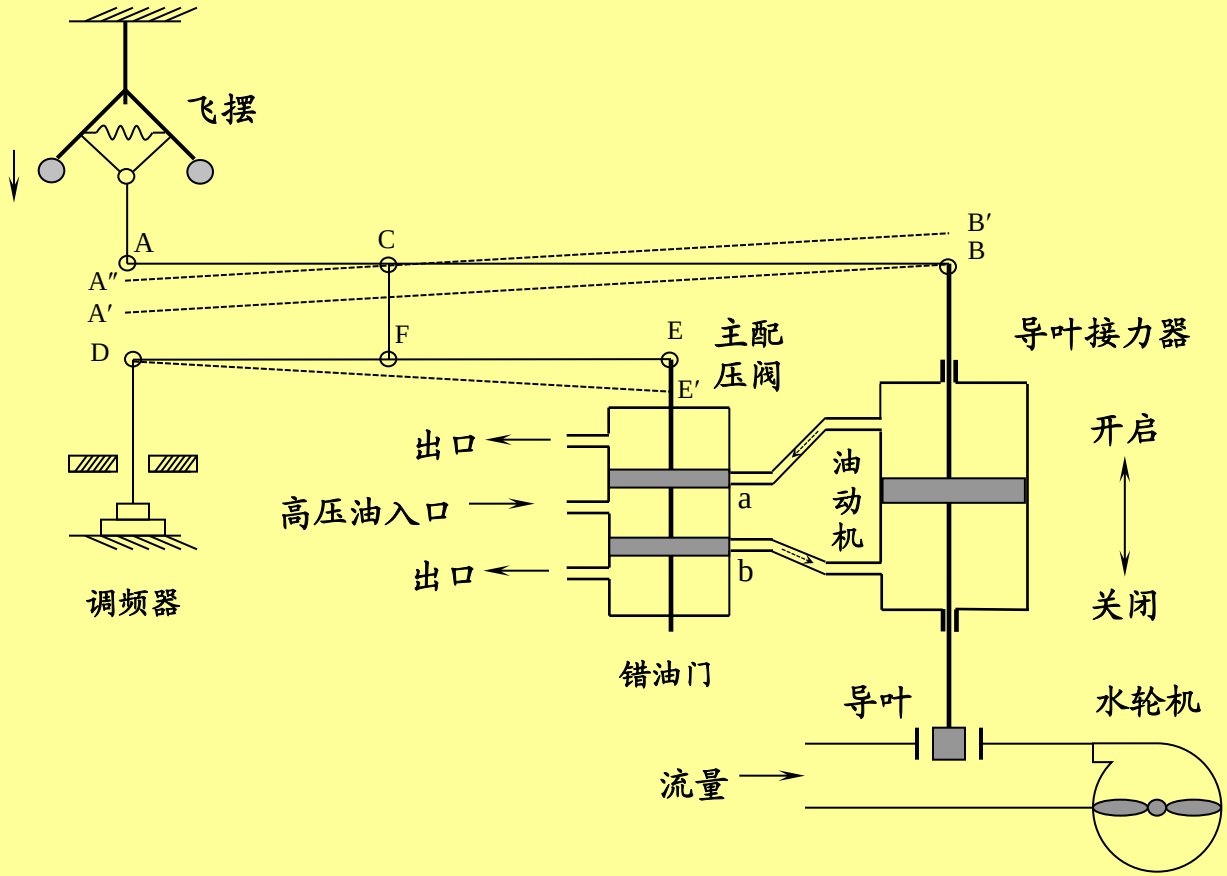
## 2、水轮机调速器

目前，国内外原动机的调速系统有很多种类型，下面介绍原始的机械调速系统（离心飞摆式调速系统）。机械式调速器的结构图如下：






- 频率降低→飞摆下降→ A 降至 A′ → E 降至 E′ → B升至 B′ → 导叶开大→ 频率升高→飞摆上升→ A′ 升至 A″ →C、F、E回到原点→ a, b油门关闭。（上述为一次调频，其结果是A″低于A，说明一次调频有偏差，需通过调频器二次调频→A″升至 A ）




A″低于A，此时为使负荷增加后机组转速仍能维持原始转速，在外界信号作用下，调频器转动，将D点抬高。杠杆DE绕F点顺时针转动（AB杆不动，故C、F不动），错油门再次向下移动，进一步加大进水量，机组转速上升，离心飞摆使A″上升。而在油动机活塞向上移动时，杠杆AB绕A″逆时针转动，带动C、F、E点向上移动，再次堵住错油门小孔，再次结束调解过程。如果D点的位移选择得恰当，A″就有可能回到原来位置A。这就是“二次调频”

## 3、频率调差系数

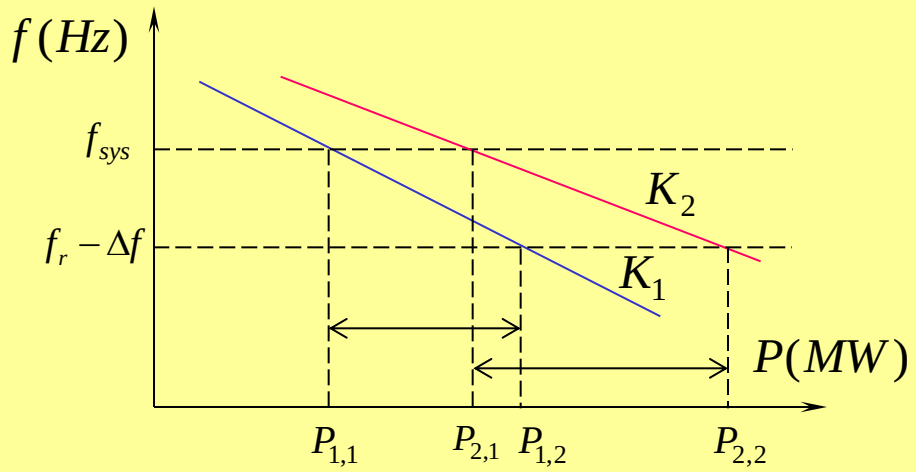
水轮发电机组的频率调差系数 $K$ 定义为

$$(f - f_*) + K(P - P_*) = \Delta f + K\Delta P = 0 \qquad \text{或} \qquad K = -\frac{\Delta f}{\Delta P}$$

式中 $\Delta P$为发电机有功功率的增量，$MW$；$f_*$和$P_*$为额定值。

$\Delta f$ 为频率差，即有功功率增量为 $\Delta P$ 时，频率相应的增量，$Hz$ 。

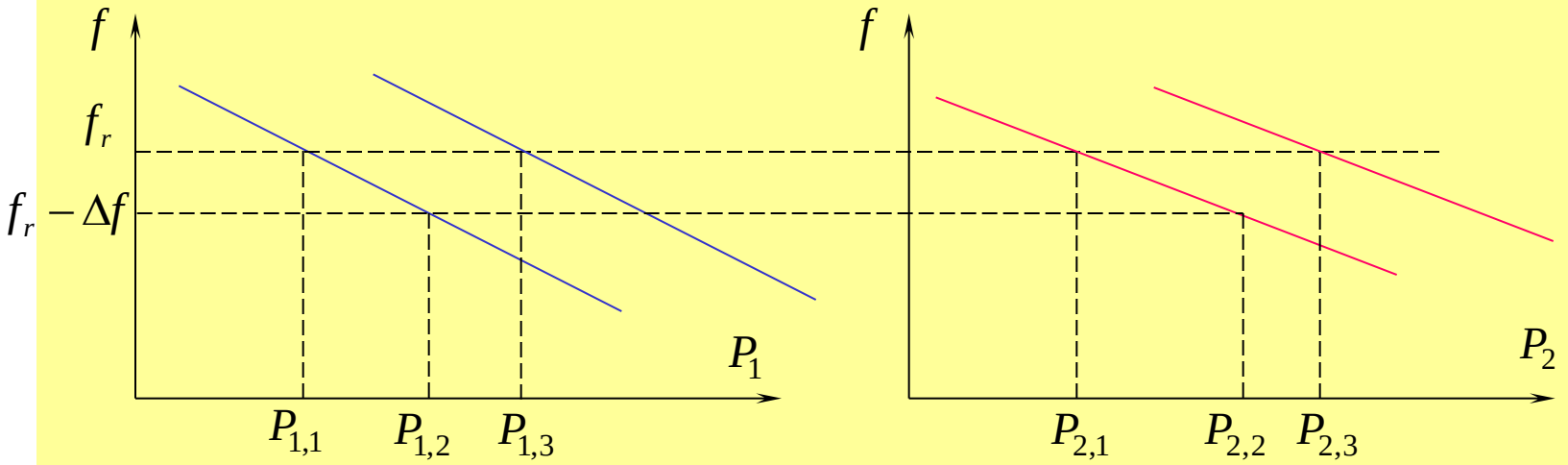
调差系数主要取决于调速器的静态调节特性（当调速器的调节过程结束，建立新的稳态时，发电机有功功率与频率之间的关系），它与机组间有功功率的分配密切相关。调差特性与机组间有功功率分配的关系，可用下图描述：

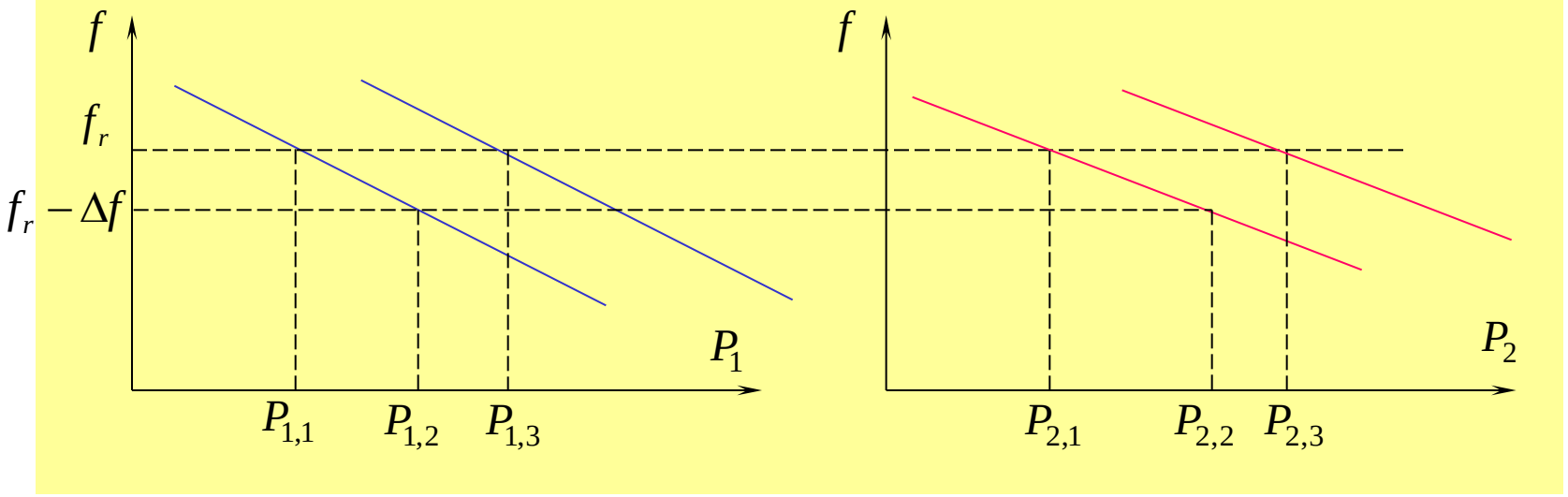



图中，向下倾斜的直线就表示发电机组的有功功率-频率静态特性曲线，它反应调整过程结束后发电机输出有功功率与频率之间的关系。直线向下倾斜，说明是有差调节，即负荷有功功率改变之后，频率不能自动回到初始值。

电力系统的调频分为一次调频和二次调频：

- 一次调频是在电力系统出现频率差时，根据调速器的调差系数来分配机组间的负荷，由调速器完成功率调节。一次调频存在频率差；
- 二次调频是在调速器调节的基础上，由自动发电控制来重新调整各运行机组的负荷，通过改变调速器的整定值，使频率静态特性曲线向上（下）平移，最终消除频率差。






如图所示，以左图1号机组为例，$P_{1,1}$到$P_{1,2}$点表示当系统频率为$f_r$时，1号机组的出力为$P_{1,1}$，当系统有功负荷增加，使得系统频率下降，此时机组在系统频率下降之后，通过调速器调节使出力增加到$P_{1,2}$而达到新的平衡，但此时的频率为$f_r$ -$\Delta f$，即未达到额定$f_r$，因此需要通过改变调速器的整定值，将功率上升到$P_{1,3}$，以消除频率差。2号机组与之类似。

## 4、利用调速器进行一次调频（有差调节）

设系统中有**n**台并列运行机组，其额定功率分别为$P_{ri}$，其调差系数分别为$K_i$。若系统出现计划外负荷$\Delta P_\Sigma$，设调频后导致相应的频率变化为$\Delta f$，求各机组承担的计划外负荷的份额$\Delta P_i$(待求量)。列出**n**台机组的调节方程：

$$\Delta f + K\Delta P = 0 \Rightarrow \left.\begin{aligned} \Delta f_* + K_1\frac{\Delta P_1}{P_{r1}} &= 0 \\ \Delta f_* + K_2\frac{\Delta P_2}{P_{r2}} &= 0 \\ &\text{M} \\ \Delta f_* + K_n\frac{\Delta P_n}{P_{rn}} &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}1)$$

式中：$\Delta f_* = \Delta f / f_r$为系统频率变化的相对值(未知量、中间量)。

上式可写为（待求量）：

$$\Delta P_i = -\Delta f_* \frac{P_{ri}}{K_i} \qquad i = 1,2,3\Lambda\ ,n$$

系统计划外负荷为：

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Lambda\ + \Delta P_n = \sum_{i=1}^{n}\Delta P_i = -\Delta f_* \sum_{i=1}^{n}\frac{P_{ri}}{K_i} \qquad (4\text{-}2)$$

则由（4-2）有：

$$\Delta f_* = -\frac{\Delta P_\Sigma}{\sum_{i=1}^{n} \frac{P_{ri}}{K_i}} \qquad (4\text{-}3)$$

由（4-1）及（4-3）式，得调节过程结束后，每台机组所承担的计划外负荷为：

$$\Delta P_i = -\Delta f_* \frac{P_{ri}}{K_i} = \frac{P_{ri}}{K_i} \frac{\Delta P_\Sigma}{\sum_{i=1}^{n} \frac{P_{ri}}{K_i}} \qquad i = 1, 2, 3\mathrm{L}\ , n \quad (4\text{-}4)$$

该方法的优点：各机组同时参加调频，没有先后之分；计划外负荷在调频机组间是按照一定的比例分配的。

该方法的缺点：由（4-3）式可知，当系统利用调速器实现频率的一次调节时，存在频率偏差$\Delta f_*$，且其偏差值与计划外负荷成正比，以及与各台机组的调差系数成正比。这是一次调频的根本缺点。

为了减少频率偏差，可将各机组调速器的调差系数整定得小一些，以使系统频率较小变化时，能导致机组出力的较大变化。但是，调差系数不宜整定得太小，否则会造成并列运行机组间不稳定分配负荷的情况（过小的调差系数会引起较大的功率分配误差，所以不宜太小）。

由（4-3）式还可知，频率偏差与系统的总运行机组容量成反比，大容量的系统在小负荷波动时，不会造成较大频率差。

为了使系统频率能够维持在预定的水平，可以规定某些电站的机组参与调频（称为调频电站和调频机组），其余电站的机组按计划负荷运行，即主导发电机法（无差调节）。

## 5、主导发电机法（无差调节）

这种调频方法是让系统中一台容量较大的机组以无差特性（调差系数 $K_1=0$）运行，由它来承担全部计划外负荷，其余机组则按有差特性运行。前者称为主导机组，后者称为基载机组，其调节方程为：

主导机组　$P_1=\Delta P_\Sigma$　即　$\Delta f=0$　按无差特性运行；

基载机组　$\Delta P_i=0$　$i=2,3,\Lambda\ ,n$　按计划负荷运行；

显然，主导机组在系统中的容量比重必须足够大，才有能力补偿全部计划外负荷。

对于较大容量的系统，可以让一个甚至几个电站的机组作为调频机组，而其余机组仍然按有差特性运行，承担计划负荷。其调节方程为：

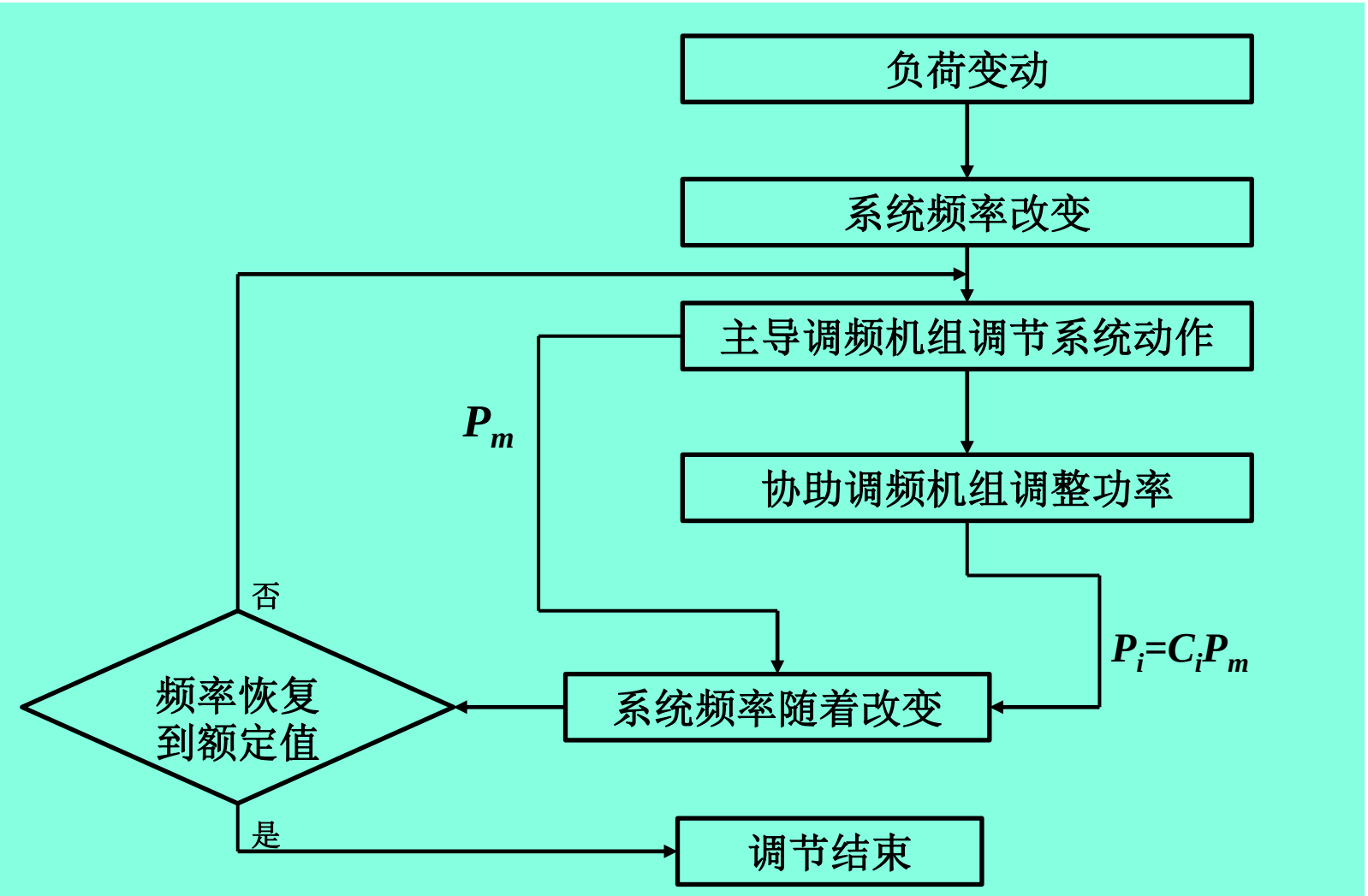
主导调频机组：　$\Delta f=0$ ，　$P_1=P_m$ 按无差特性运行；

其余调频机组：　$P_i=C_iP_m$ ；

计划外负荷：　$\Delta P_\Sigma=(1+\sum C_i)P_m$ ，$i=2,3,\Lambda\ ,n$ ；

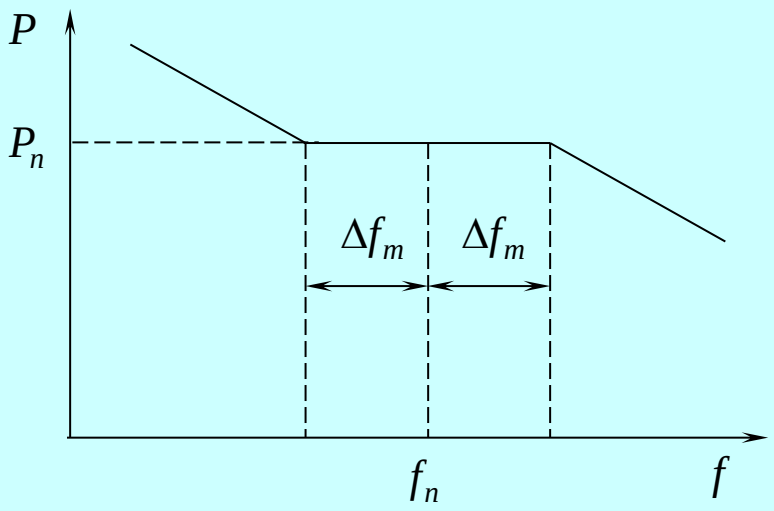
式中：　$C_i$ 为第 $i$ 台调频机组计划外负荷分配系数。

调频过程：




该方法中各调频机组的出力也是按照一定的比例分配的，但各机组在调频过程中的作用时间有先后，缺乏“同时性”，且存在调节缓慢的问题，适应于中小电力系统。

当电力系统正常运行时，系统中的绝大多数运行机组不参与调频，而按电站的日负荷曲线所规定的方式运行，并按优化方式分配机组间负荷，称为调功运行。但是，在特殊情况下，当系统频率差超过了允许水平时，为了系统能安全稳定运行，希望调功机组也能对系统频率作出响应，其所带负荷与频率的关系如图所示。

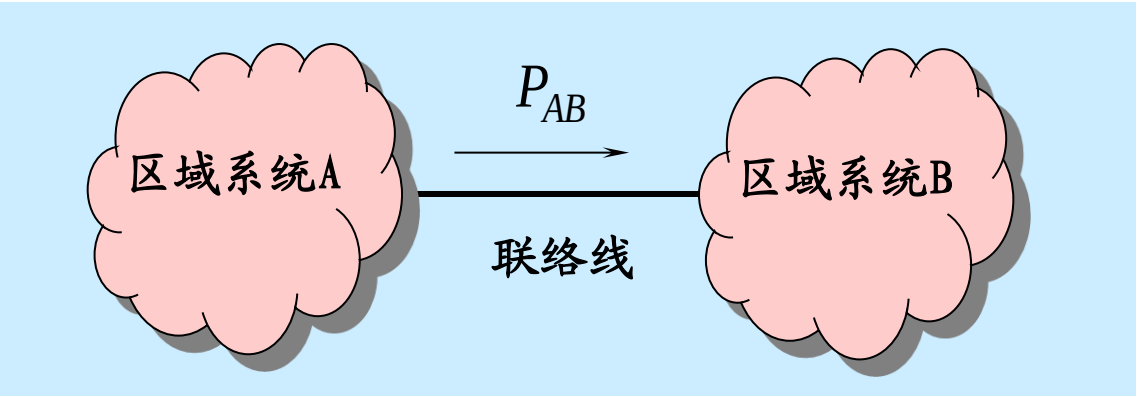


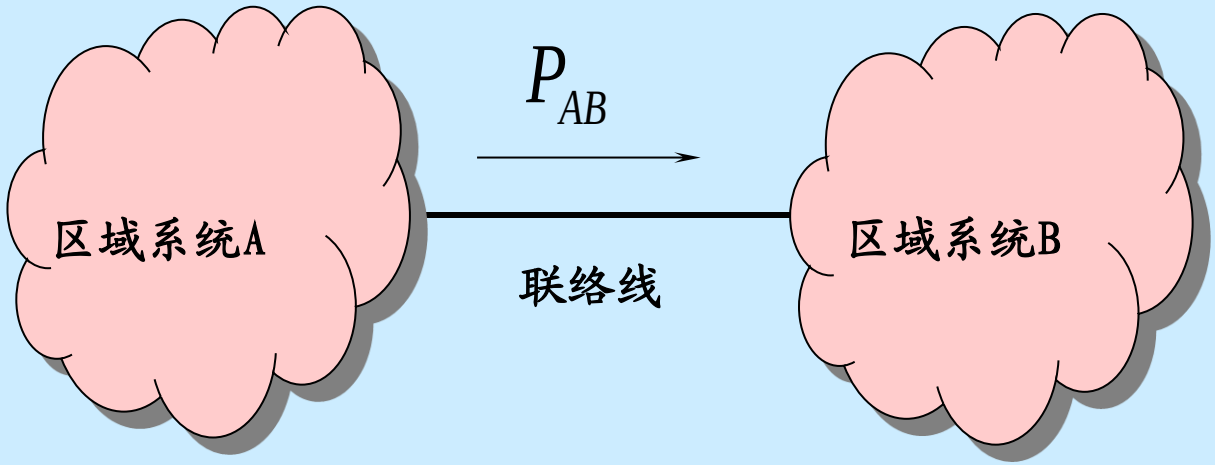

为此，须在调功机组的功率控制装置中设置人工不灵敏区$\pm\Delta f_m$。这样，当频率偏差 $|\Delta f| < \Delta f_m$时，不参与调频，仍按计划运行；而当频率偏差 $|\Delta f| > \Delta f_m$ 时，则调节机组的出力，对频率变化作出响应。

## 6、分区调频法

当多个区域（或省）级电力系统联合成一个大的电力系统时，为了配合分区调度管理，同时也为了避免集中调频的范围过大而产生的技术困难，在联合系统中一般采用分区调频法。分区调频法的特点是，区内非计划负荷的变动主要由该区内的调频厂来负担，其它区的调频厂只是支援性质，因此区间联络线上的功率基本上应该维持为计划的数值。所以，分区调频方程式必须能判断当时负荷的变动是否发生在本区之内，并采取相应的调节措施。

现以下图所示的联合电力系统为例，说明判别负荷变动是否发生在本区之内的原理：






设经联络线由$A$区流向$B$区的调频功率为$P_{AB}$，且由$B$区流向$A$区的调频功率为$P_{BA}$，则必有$P_{AB}+P_{BA}=0$，当$B$区内负荷突然增加，$A$区负荷不变时，整个系统的频率都会下降，即有$\Delta f<0$。此时联络线上由$A$区流向$B$区的功率增加，即$\Delta P_{AB}>0$，且与$\Delta f$异号；同时在另一端必有$\Delta P_{BA}<0$ 且与$\Delta f$同号。这说明在联合电力系统中可以根据联络线上功率增量和频率变化的符号，来判断负荷变化所在的区域。

① $\Delta f$和$\Delta P_{AB}$的符号相同，本区域有负荷变动

② $\Delta f$和$\Delta P_{AB}$的符号不同，它区域有负荷变动

为了使非负荷变动区内的调频机组在系统的调频过程中尽可能少地输出调频功率$\Delta P_{AB}=P_A-P_{A,n}\approx 0$，因此区间联络线上的功率基本上应该维持为计划的数值$P_{A,n}$。所以，分区调频方程式必须能判断当时负荷的变动是否发生在本区之内，并采取相应的调节措施。

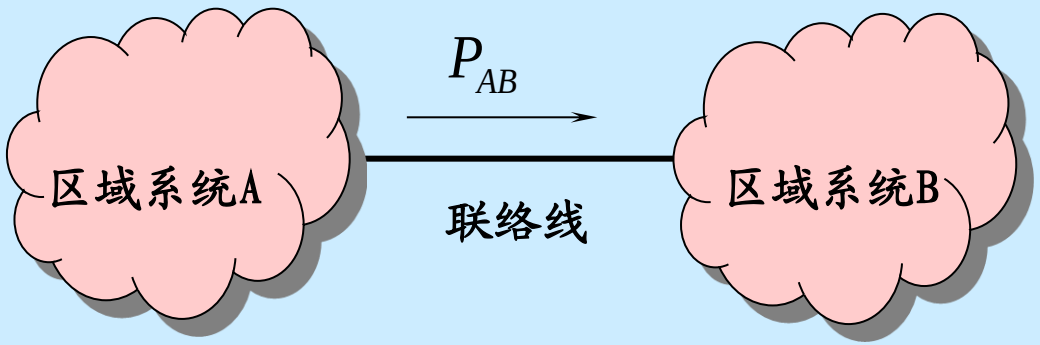
设*A*区调频方程式为

$$\Delta P_A + K_A \Delta f + \Delta P_{AB} = 0$$

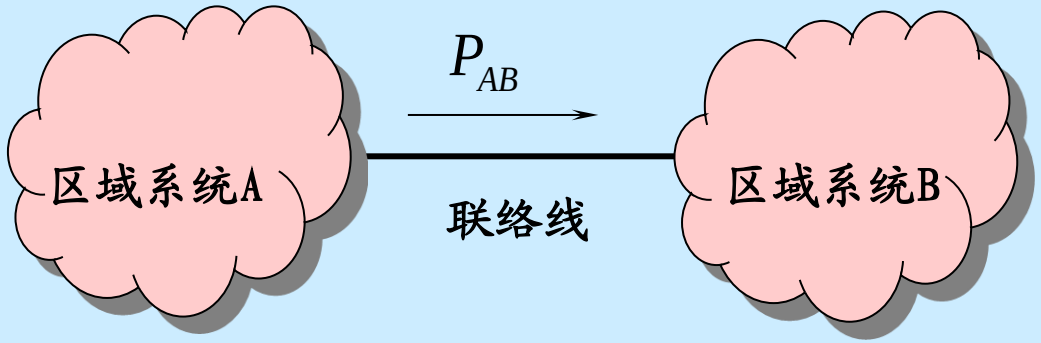
式中 $\Delta f = f - f_r$为频率偏差； $\Delta P_{AB}$为联络线功率增量；

$K_A$为*A*区的功率调整系数；$\Delta P_A$为*A*区机组输出的调频功率；

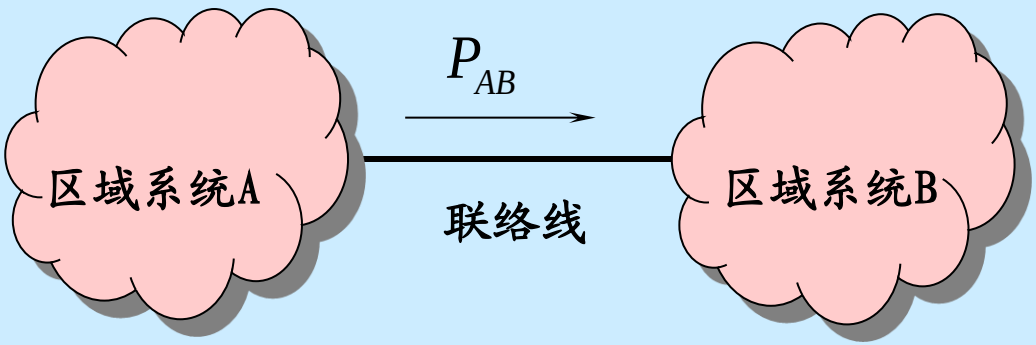
下面仍以前图所示的联合电力系统为例，对调频方程式进行说明：




- 当B区内负荷突然增加时：对于$A$区，$\Delta f<0$，$\Delta P_{AB}>0$，由于有适当的功率调整系数$K_A$，致使$K_A\Delta f+\Delta P_{AB}\approx 0$，调频器按照调频方程（$A$区调频方程：$\Delta P_A+K_A\Delta f+\Delta P_{AB}=0$）动作，最终使得$A$区调频机组的出力增量$\Delta P_A\approx 0$，即A区机组调频出力不变，基本不向B区输出调频功率；对于$B$区，$\Delta f$与$\Delta P_{BA}$都为负，于是调频控制器就向增大$\Delta P_B$的方向调整。




- 而当$A$区内负荷突然增加时:对于B区，$\Delta f<0$，$\Delta P_{BA}>0$，由于有适当的功率调整系数$K_B$，致使$K_B\Delta f+\Delta P_{BA}\approx 0$，调频器按照调频方程（$B$区调频方程：$\Delta P_B+K_B\Delta f+\Delta P_{BA}=0$）动作，最终使得$B$区调频机组的出力增量$\Delta P_B\approx 0$，即B区机组调频出力不变，基本不向$A$区输出调频功率；对于$A$区，$\Delta f$与$\Delta P_{AB}$都为负，于是调频控制器就向增大$\Delta P_A$的方向调整。这样就可以达到分区调频的目的。




由此可见，$K_i\Delta f+\Delta P_{tie.i}$是实现分区调频的重要因子，一般称为分区控制误差$ACE$，即

$$ACE = K_i\Delta f + \Delta P_{tie.i}$$

其中，$\Delta P_{tie.i}$为 联络线交换功率偏差，$\Delta P_{tie.i} = P_{tie.i.a} - P_{tie.i.s}$ (实际值减去计划值)；若$ACE$=0，则由$\Delta P_A+K_A\Delta f+\Delta P_{AB}$=0知$\Delta P_A$=0，表明本区域无负荷变动，无需调频。

# 4.3 自动发电控制（AGC）

## 1、概述（功率控制类型及AGC构成）

电力系统中发电功率的控制一般分为三种情况：

- 由调速器实现的控制，通常称为频率的一次调整控制；
- 由自动发电控制实现的控制，通常称为频率的二次调整控制；
- 由经济运行要求实现的控制，通常称为经济运行控制。

上述三种频率-功率控制方式是有差别的：

- 由调速器实现调频以控制发电机组的输出功率，其响应速度较快，可适应小负荷、短时间的波动（即一次调频）；
- 对周期在0s至多2~3min以内而幅值变化较大的负荷，已经不能由调速器本身的调频特性来进行调整控制，就需要由计算机监控系统根据电力系统的频率差，来启动AGC来控制运行机组的负荷（即二次调频）；

- 对于周期在**3min** 以上的负荷波动，可以根据以往实测负荷的变化情况和预测几分钟后总负荷变化趋势，由自动发电系统计算出发电机组最经济的输出功率，由控制系统进行自动功率控制（即经济运行）。

自动发电控制是在应用自动控制技术和计算机技术的基础上，根据电力系统的频率差来控制水电站内各运行机组的出力，实现机组间负荷的经济分配，并最终消除频率差。

自动发电控制系统包括两个部分：

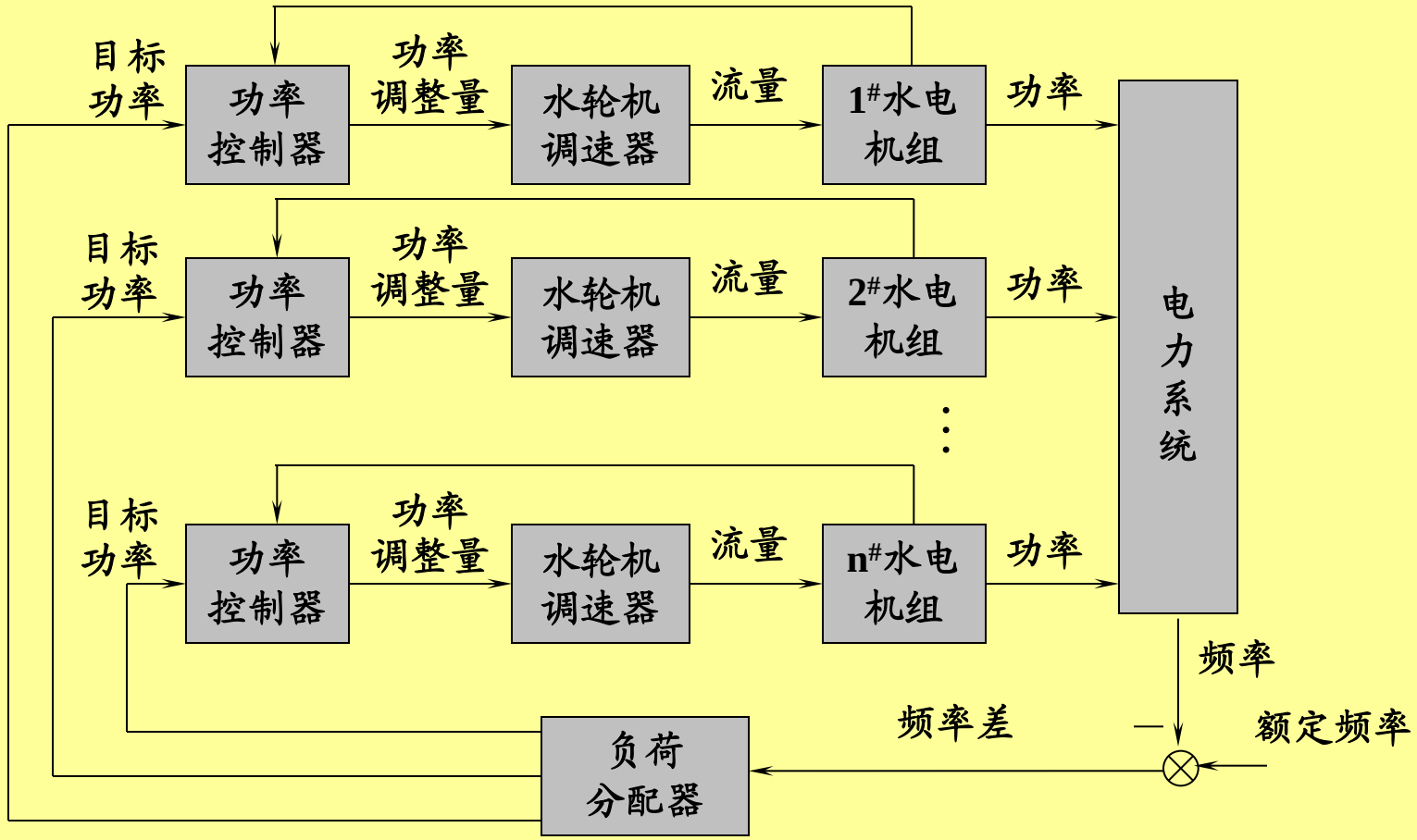
- 负荷分配器

根据电力系统的频率差，按照一定的机组间负荷优化分配准则来计算水电站内各运行机组的最优目标出力。

- 水轮发电组功率控制器

根据负荷分配器所确定的最优目标出力，控制调速器的调节特性，使发电机组在电力系统额定频率下所发出的实际功率与目标功率相一致。

自动发电控制系统的构成如下图所示：



## 2、调频与负荷分配

自动发电控制中的负荷分配器通常采用以“基点经济功率$P_{hi}$”和“分配系数$\alpha_i$”来表示每台发电机组输出功率的方法，即各台机组的目标功率按以下公式分配

$$P_{ci} = P_{hi} + \alpha_i \left( \sum_{i=1}^{n} P_{Gi} + ACE - \sum_{i=1}^{n} P_{hi} \right)$$

式中，$P_{ci}$为各台机组的目标功率；$P_{hi}$为各台机组的基点经济功率；$P_{Gi}$为各台机组的实际功率（计划值）；$\alpha_i$为分配系数。

这种方法把自动调频与负荷的经济分配联系起来了：当ACE信息为零时，系统符合完全按经济运行的原则进行分配；当系统中负荷变化时，功率平衡遭到破坏，将产生ACE信息，ACE信息的功率将按$\alpha_i$的系数来分配，而当系统功率恢复平衡时，ACE信息消失，这时系统总的发电功率仍然以经济运行的原则进行分配。它是一种比较理想的功率控制方式。

上式表明，在自动发电控制中各台机组的目标功率，取决于各台发电机组总的实际发电功率和总的基点经济功率，以及系统的频率偏差和功率偏差。偏差越大，各发电机组目标功率的变动就越大。当频率偏差和功率偏差趋于零时，AGC系统发电机组总的目标功率就与发电机组总的实际功率相等。分配到各台发电机组的目标功率则由分配系数 $\alpha_i$ 来决定。

$$P_{ci} = P_{hi} + \alpha_i \left( \sum_{i=1}^{n} P_{Gi} + ACE - \sum_{i=1}^{n} P_{hi} \right)$$

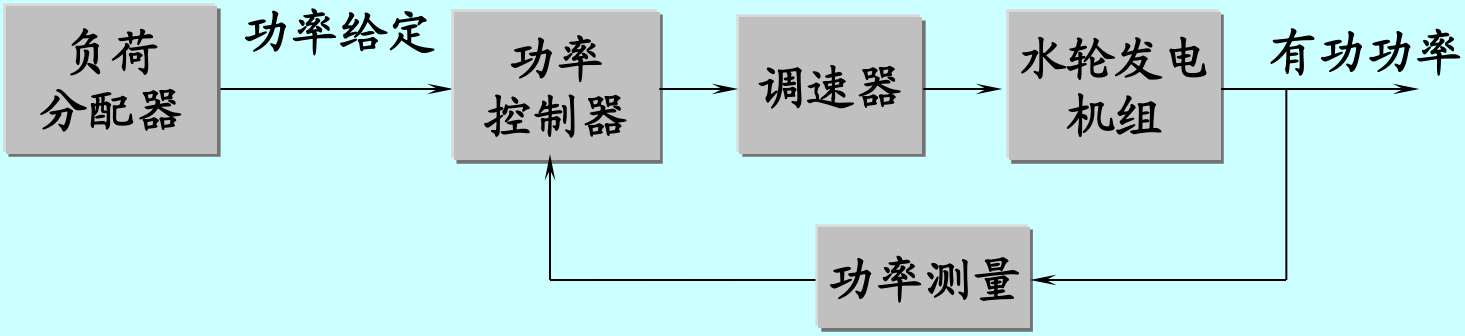
自动发电控制系统的任务是针对变化周期为**10s~3min**的负荷进行调整的。负荷的控制调整可以全部由计算机系统来承担。其中，负荷分配由电站级计算机系统完成，而目标功率控制则由机组级计算机控制系统来实现。

## 3、水电机组有功功率的自动控制

水电机组的有功功率的控制通常是通过水轮机调速器来完成。水轮机调节系统是一种非线性、时变、非最小相位的多变量高阶系统，其特性随运行工况变化而改变。在现代电力系统中，水电机组通常是并入大电网运行的。由于电力系统的惯性很大，单台机组的出力变化对电网的频率几乎没有影响。因此，对于水轮机调速系统而言，转速反馈几乎不起作用，调速控制不存在稳定性问题，而在功率控制时只考虑其速动性问题，即在满足水压和功率波动约束条件下，使功率控制的调整时间尽可能短。

## （1）水电机组有功功率控制模型

水电机组并入大系统运行时，由于机组出力的改变不会引起系统频率的变化。因此，调功机组的调速器的频率反馈不起作用，机组按给定负荷运行。功率控制系统如图所示。




在系统频率 $f$ 和机组水头 $h$不变的条件下，机组稳定时的导叶开度 $y$ 与机组功率 $P$ 是确定的关系：$P = P(h, y) = Khq(y)\eta$

## （2）有功功率的控制策略

设：$P_r$为机组的目标功率，$P$ 为机组的实际功率。由于水电机组的功率控制是通过调速器来实现的，在一般情况下，调速器接受控制系统的开关量控制信号，因此机组功率控制属于开关型反馈控制，其基本控制原理是根据功率偏差：$\Delta P = P_r - P$，确定控制信号，通过调速器调整机组的导叶开度，改变机组的出力，使机组的功率跟踪计划功率，使 $|\Delta P| \le \delta$ ，并具有稳定、快速和平稳的控制品质。

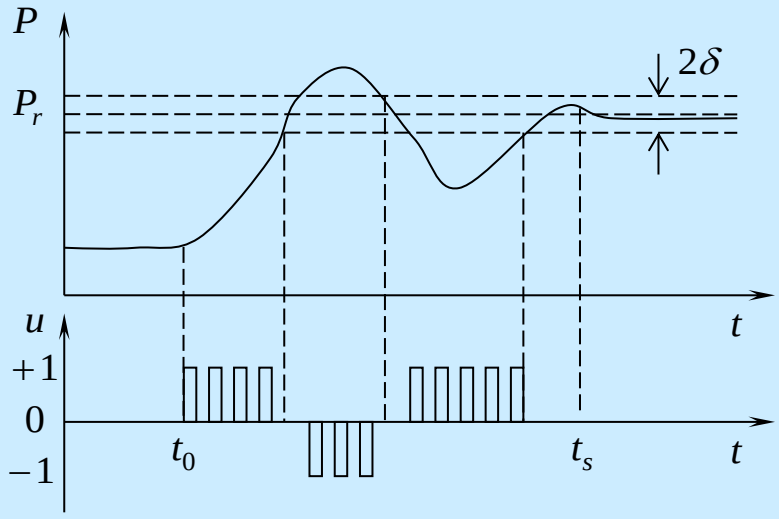
在功率控制中，通常是根据所采用的控制策略制定控制脉冲的宽度和个数，来适应功率调节值的大小。其中包括：等周期调制控制、PID调制控制、基于李雅普诺夫函数的开关控制、智能控制和最优时间控制等功率控制策略。

- **等周期调制控制**

控制策略为

$$u(t)=\begin{cases}\text{正向脉冲：}\ u=+1 & \text{当：}\ \Delta P>\delta \\ \text{反向脉冲：}\ u=-1 & \text{当：}\ \Delta P<-\delta \\ \text{停止控制：}\ u=0 & \text{当：}\ |\Delta P|\le\delta\end{cases} \qquad \Delta P=P_r-P$$

这种控制方式要预先整定好控制脉冲的宽度，控制以脉冲个数的多少来适应功率调节值的大小。其中，脉冲宽度须按最小调节量来整定，因为受调节精度的约束，这个调节量的相对值一般都很小。但由于功率调节具有“导叶接力器移动速度与脉冲信号大小成正比”的一般规律，因此在上述窄脉冲的控制下，功率调节速动性就不可能高。




等周期调制控制的优点是控制简单、实现方便。

缺点是控制速度取决于脉冲宽度T，太窄则速度慢，太宽则精度差；同时，控制信号没有反映功率变化的速度。

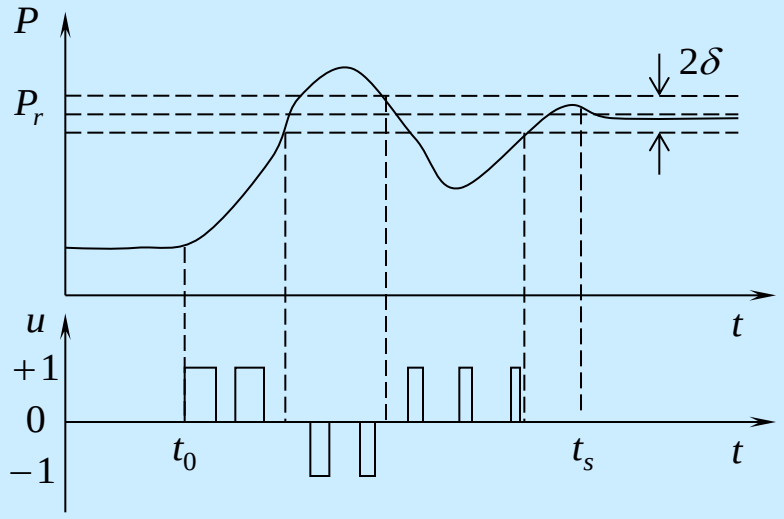
- PID调制控制

针对等周期调制控制的缺陷，***PID***调制控制根据功率偏差及其变化的速度，采用了变脉冲宽度的控制策略

$$u(t)=\begin{cases}+1; & \Delta P>\delta;\\ -1; & \Delta P<-\delta;\\ 0; & |\Delta P|\le\delta;\end{cases}\qquad \Delta P=P_r-P$$

脉冲宽度的计算式为

$$T_u=K_p\Delta P+K_i\int\Delta P dt+K_d\frac{d\Delta P}{dt}$$




PID调制控制是在等控制周期 $T$ 内根据 $\Delta P$ 的符号确定控制极性；根据对 $\Delta P$ 的PID运算，确定调制控制脉冲宽度 $T_u$。与等周期调制控制相比提高了控制速度和控制精度。

## 作业：

1. 问答题

（1）维持电力系统频率稳定的条件是什么？

（2）什么是调频机组和调频电站？

（3）什么是电力系统的日负荷曲线和计划外负荷？

（4）什么是一次调频和二次调频？

（5）有调节能力水电站和径流式水电站运行机组间负荷优化分配的准则各是是什么？

2. 简答题

（1）简要说明有功功率无差调节的原理。

（2）简要说明水电机组的有功功率控制的目的和内容。

3. 写出离散PID调制控制策略的表达式。

# The End