



## 第五章

# 电力系统的有功功率和频率调整

# 问题的提出

- 电力系统**正常运行状态**的**优化和调整**问题（针对电力系统**优质、经济**的要求）
- **优质—电能质量**的三个方面：
  - 频率质量（频率偏移）：与**有功功率分配**和**频率调整**有关——**第五章**
  - 电压质量（电压偏移）：与**无功功率分配**和**电压调整**有关——**第六章**
  - 波形质量（波形畸变率）：波形畸变与**谐波及其治理**有关。
- **经济性**：电力系统领域研究的重要问题之一，由于学时限制不作为基本内容

# 主要内容

---

- 电力系统有功功率平衡
- 电力系统中各类发电厂的运行特点和合理组合
- 频率调整的原理、方法、相关计算

# 目录

---

- 第一节 电力系统有功功率的平衡
- 第二节 电力系统有功功率的最优分配
- 第三节 电力系统的频率调整

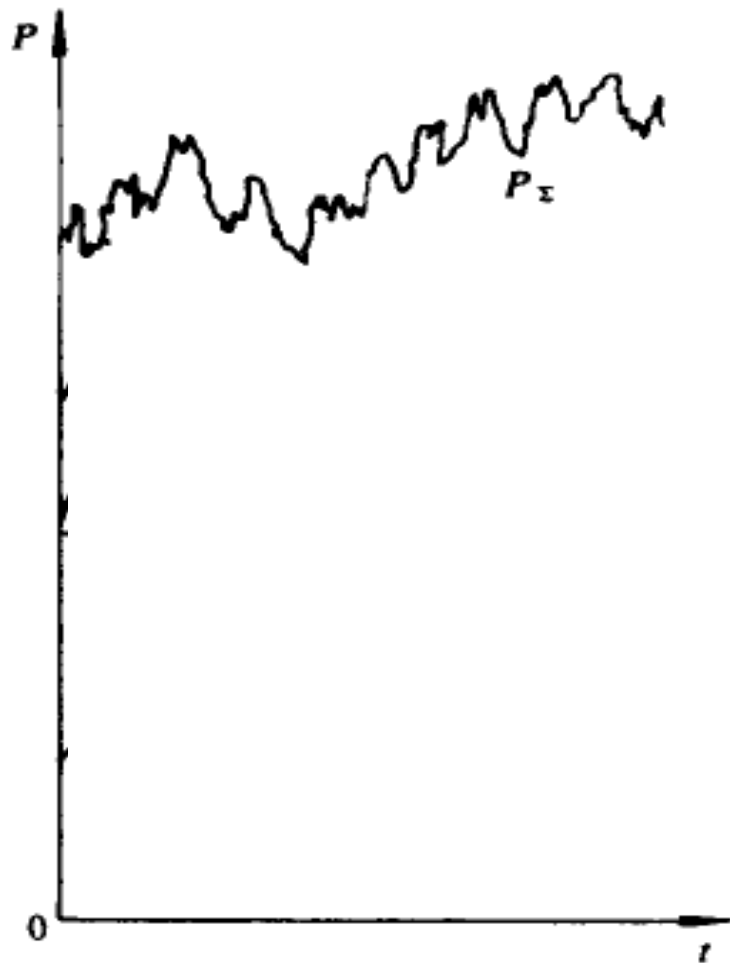
# 目录

---

- 第一节 电力系统有功功率的平衡
  - 有功负荷的变动和调整控制
  - 有功负荷曲线的预计
  - 有功功率电源和备用容量

# 有功功率负荷的变动和调整控制

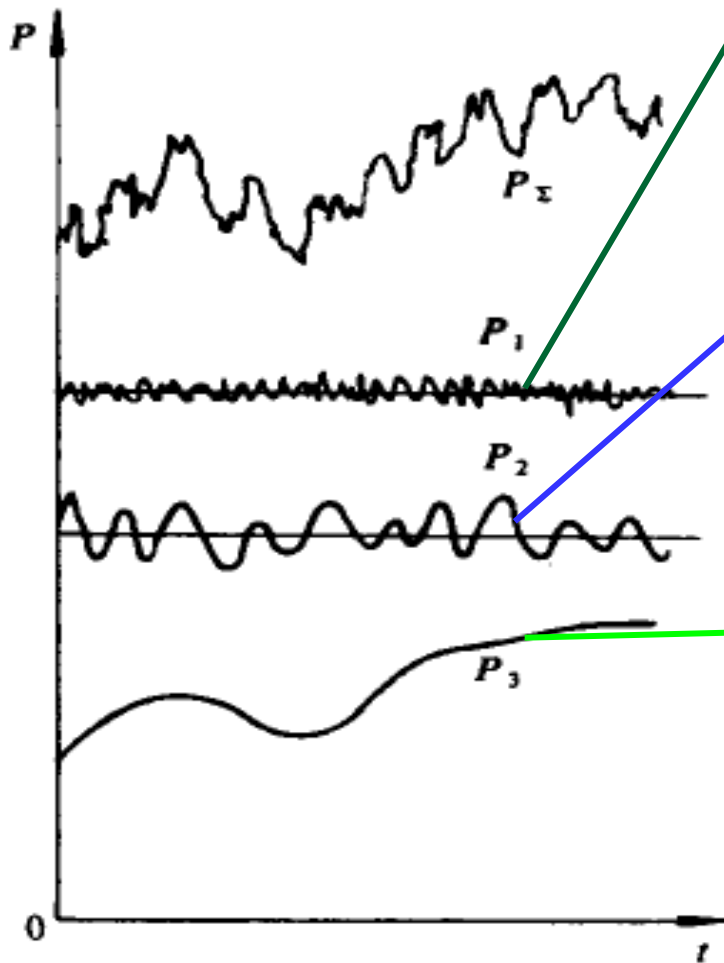
## ■ 有功负荷的变动



- $P_{\Sigma}$ —实际不规则的负荷变动
- $P_1$ —第一种负荷变动
- $P_2$ —第二种负荷变动
- $P_3$ —第三种负荷变动

# 有功功率负荷的变动和调整控制

## ■ 有功负荷变动的分类

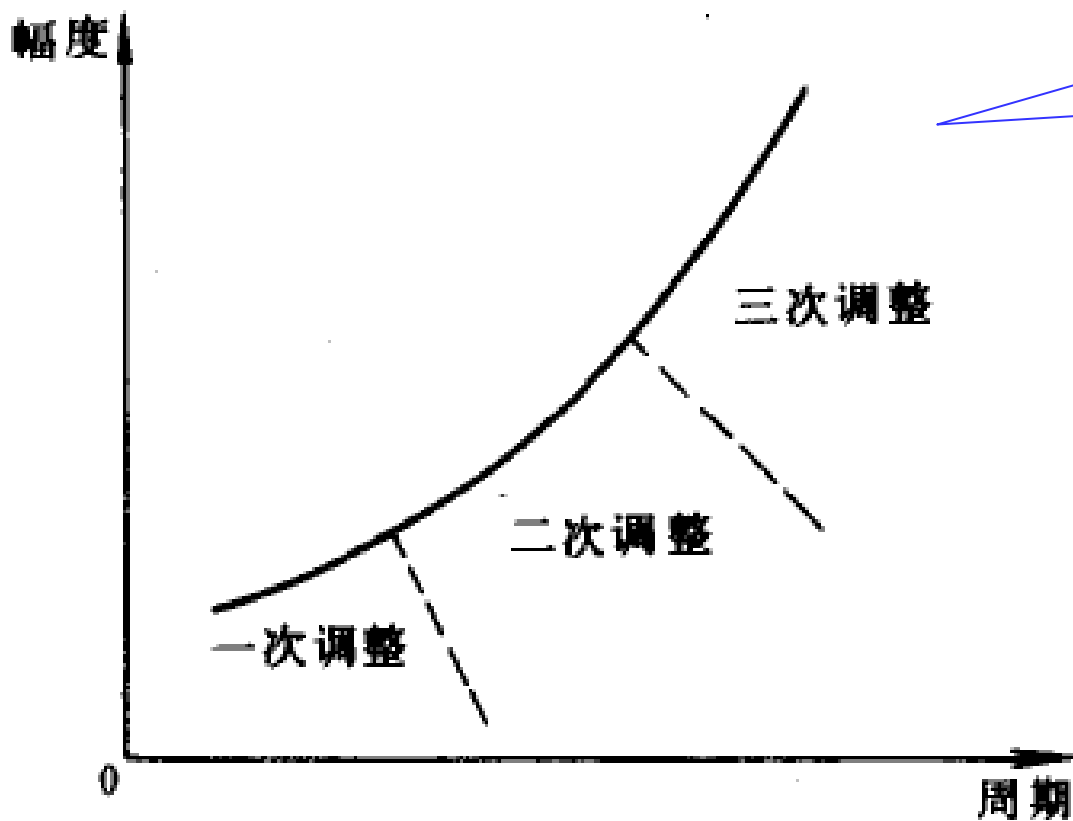


变动幅度很小，周期很短(10s以下)，有很大的偶然性，主要由中小型用电设备的投切引起。

变动幅度较大，周期较长(10s-几分钟)，主要由冲击性负荷（如电炉、压延机械、电气机车等）引起。

变动幅度最大，周期最长(年、月、日)，由生产、生活、气象等变化引起的负荷变动，基本可预测，可编制为负荷曲线。

# 有功功率负荷的变动和调整控制



负荷变动的幅度愈大，  
周期就愈长

有功负荷变动为什么会引起系统频率变化？



# 有功功率负荷的变动和调整控制

- 有功和频率调整的**含义**
- 有功和频率调整的**分类**

## 一次调频

- 针对**第一种负荷变动**引起的频率偏移
- 由发电机组的**调速器**自动跟踪调整

## 二次调频

- 针对**第二种负荷变动**引起的频率偏移
- 通过手动或自发电控制(AGC)系统操作发电机组的**调频器**进行调整
- 承担二次调频任务的发电厂称为**调频厂**，其母线通常可设为潮流计算的**平衡节点**

## 三次调频

- 按经济调度的原则在各发电厂间分配**第三种有规律变化的负荷**，责成各发电厂按给定发电负荷曲线发电（**负荷监视厂**）

# 有功功率负荷曲线的预计

- 电力系统负荷预测的重要内容
- 调度部门预先编制的日负荷曲线大体反映了第三种负荷变动，是制定调度计划(三次调整)的主要依据

## 预测方法

传统方法  
(经验法)

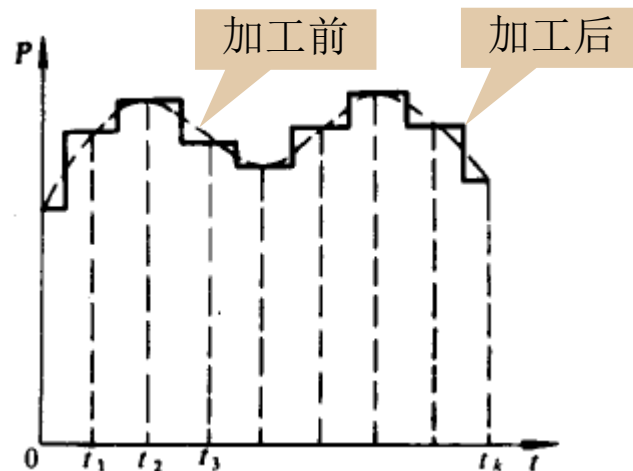
新方法

回归分析、时间序列法、神经网络，等

# 编制有功日负荷曲线的传统方法

- 1 参照长期积累的**实测**的有功功率日负荷曲线，进行相应的**加工**

**加工原则：**加工前后最大、最小负荷及曲线下的面积相等



- 2 收集用电大户申报的未来若干天的**预计**负荷
- 3 通过1和2预计系统的综合**用电负荷**
- 4 计入**网络损耗**和**厂用电**，得到系统**供电负荷**

确定各发电厂的日发电计划

# 网络损耗和厂用电

## ■ 网络损耗

- 一般占系统总负荷的6-10%
  - **不变损耗**：与负荷大小无关（变压器空载损耗）
  - **可变损耗**：与负荷的平方成正比（变压器和线路电阻中的损耗）

## ■ 厂用电

- 发电厂本身消耗的功率（自用功率）
- 各类发电厂的厂用电**占电厂最大负荷**的比例：  
水电厂0.1% ~ 1%；火电厂5% ~ 8%；核电厂4% ~ 5%

# 电力系统的有功功率电源

- 电力系统有功电源：各类发电厂的发电机
- 电力系统可供调度的电源容量：
  - 各发电厂可投入发电设备的可发功率之和
  - 电力系统可供调度的电源容量 < 总装机容量
    - 机组的定期检修停机
    - 发电机组的故障停机
    - 水电厂的发电机由于水头降低而降额运行

# 有功功率备用容量

- **概念**：系统**电源**容量大于发电负荷的部分
- 设置有功备用容量的**原因**：保证可靠供电和良好电能质量。
- **分类**：

## 按形式分类

热备用  
(旋转备用)

冷备用

## 按用途分类

负荷备用

事故备用

检修备用

国民经济备用

# 有功备用容量按形式分类

- 热备用（旋转备用）：运转中的发电设备的最大可发功率与实际所发功率之差
- 冷备用：未运转、但随时能启动的发电设备可发的最大功率。
- 注意：
  - 电力系统必须设置一定量的热备用
  - 热备用也不宜设置过多

# 有功备用容量按用途分类

## ■ 负荷备用：

- 调整系统中短期负荷波动并担负计划外的负荷增加而设置的备用
- 一般为最大负荷2% ~ 5%

## ■ 事故备用

- 为保证电力用户在发电设备发生偶然性故障时不受严重影响、维持系统正常供电而设置的备用
- 一般为最大负荷的5% ~ 10%，但不得小于系统中最大机组的容量



# 有功备用容量按用途分类

## ■ 检修备用

- ❑ 为发电设备定期检修而设置的备用
- ❑ 与负荷大小关系不密切
- ❑ 只有在负荷季节性低落期间和节假日安排不下所有设备的大、小修时才设置

## ■ 国民经济备用：

- ❑ 为负荷的超计划增长而设置的备用

# 各种备用容量的关系

系统电源容量				
系统发电负荷	备用容量			
	负荷备用 2%~5%	事故备用 5%~10%	检修备用 (视需要)	国民经济 备用
	热备用		冷备用	



运转中发电设备可发的最大功率



# 目录

---

- 第一节 电力系统有功功率的平衡
- ☞ 第二节 电力系统有功功率的最优分配
- 第三节 电力系统的频率调整

## 第二节 电力系统有功功率的最优分配

- 有功**电源**的最优组合：
  - ✓ 机组的合理开停（**最优组合顺序**、数量、开停时间）
  - ✓ 实质：**冷备用容量**的合理分布
  - ✓ 常用方法：最优组合顺序法、动态规划法  
(**课堂讲解内容**：各类发电厂的运行特点、各类发电厂的合理组合)
- 有功**负荷**的最优分配：
  - ✓ 一定量的负荷在运行中的发电机或发电厂中的合理分配
  - ✓ 实质：**热备用容量**的合理分布
  - ✓ 常用方法：等耗量微增律准则

# 各类发电厂的运行特点

## □ 发电方式按一次能源形式分为：

- 火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、地热发电、太阳能发电，等
- 火力发电：利用煤、石油、天然气等燃烧所产生的热能，在锅炉中将水变成高温高压蒸汽，推动汽轮机，带动发电机发电。
- 水力发电：利用河流的水能发电，发电功率与流量和落差的乘积成正比。
- 核能发电：利用核燃料在反应堆中产生的热能，将水变成蒸汽，推动汽轮机，带动发电机发电。

# 各类发电厂的运行特点

## 火力发电厂

- ❑ 锅炉的**技术最小负荷**为额定负荷的25%-70%
- ❑ 汽轮机的**技术最小负荷**为额定负荷的10%-15%
- ❑ 锅炉和汽轮机退出运行和再度投入或承担急剧变动负荷时会耗能、费时、易于损坏设备
- ❑ 火电厂的锅炉和汽轮机分为：
  - 高温高压 - 效率高，灵活调节的范围窄
  - 中温中压 - 效率较低，灵活调节的范围较宽
  - 低温低压 - 技术经济指标最差，应淘汰
- ❑ **热电厂**（供热式火力发电厂）：效率高，最小负荷取决于热负荷（强迫功率）

# 各类发电厂的运行特点

---

## 核电厂

- ❑ 反应堆的负荷没有限制
- ❑ 汽轮机的技术最小负荷为额定负荷的10%-15%
- ❑ 反应堆和汽轮机退出运行和再度投入或承担急剧变动负荷时会耗能、费时、易于损坏设备
- ❑ 核电厂一次投资大，运行费用小

# 各类发电厂的运行特点

---

## 水电厂

- 水电厂的**强迫功率**：为保证河流下游的灌溉、通航，向下游释放一定水量时发出的功率
- 水轮机**技术最小负荷**视水电厂的具体条件而异
- 水轮机的退出运行和再度投入操作简单，所需时间短、不需额外耗能
- 水轮机承担急剧变动负荷时，不需额外耗能和花费时间
- 水头过分低落时，水轮机组可发功率降低



# 各类发电厂的运行特点

## ■ 水电厂的分类：

无调节水库水电厂	<ul style="list-style-type: none"><li>• 所发功率取决于河流的天然流量</li><li>• 一昼夜所发功率基本不变</li></ul>
有调节水库水电厂	<ul style="list-style-type: none"><li>• 运行方式取决于水库调度所给定的水电厂耗水量。洪水季节（丰水期）满负荷运行，枯水季节承担急剧变动负荷。</li><li>• 按库容或调节周期分为：日调节、月调节、季调节、年调节、多年调节等调节方式。</li></ul>
抽水蓄能水电厂	<ul style="list-style-type: none"><li>• 用于调节（减小）系统有功功率负荷的峰谷差。</li><li>• 电厂上、下方各有一个水库。低谷负荷时，抽水蓄能；高峰负荷时，放水发电。</li><li>• 一次抽水蓄能、放水发电循环的总效率通常在70%左右。</li></ul>

# 各类发电厂的运行特点

## ■ 要点总结

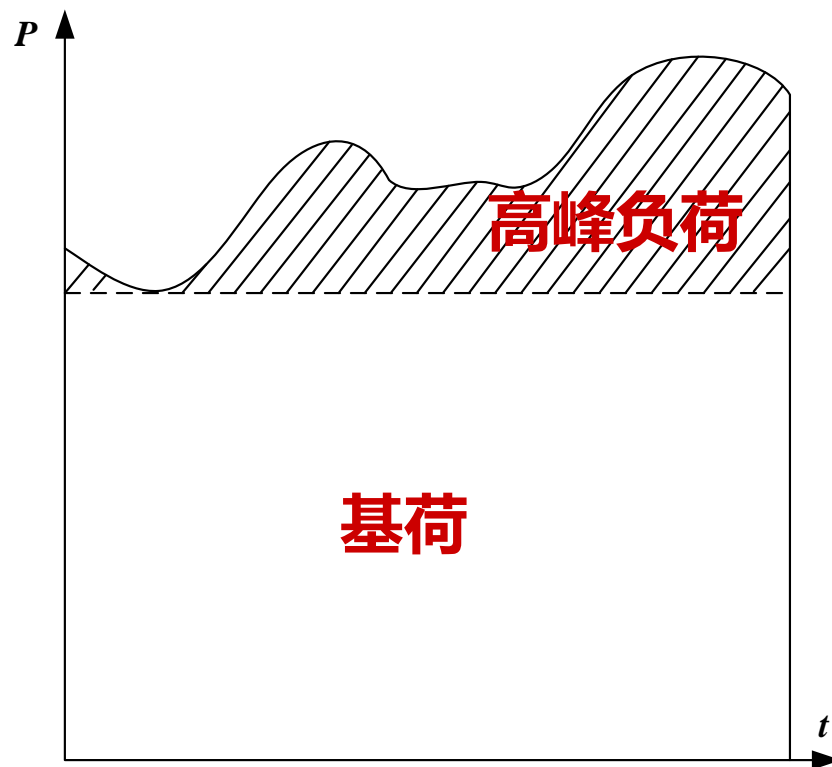
火电厂	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 有最小技术出力限制</li><li>■ 可调范围小，调节过程耗时、耗能</li><li>■ 热电厂的强迫功率取决于热负荷</li><li>■ 效率与蒸汽参数有关</li></ul>
水电厂	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 可调范围大、出力调节速度快、耗能少</li><li>■ 出力受水头限制</li><li>■ 运行方式受库容及航运、灌溉等限制</li><li>■ 强迫功率取决于水电厂的具体条件</li></ul>
核电厂	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 一次性投资大、运行费用小</li><li>■ 出力调节过程耗时、耗能、易损坏设备</li></ul>

# 各类发电厂的合理组合

## ■ 基荷和峰荷的概念

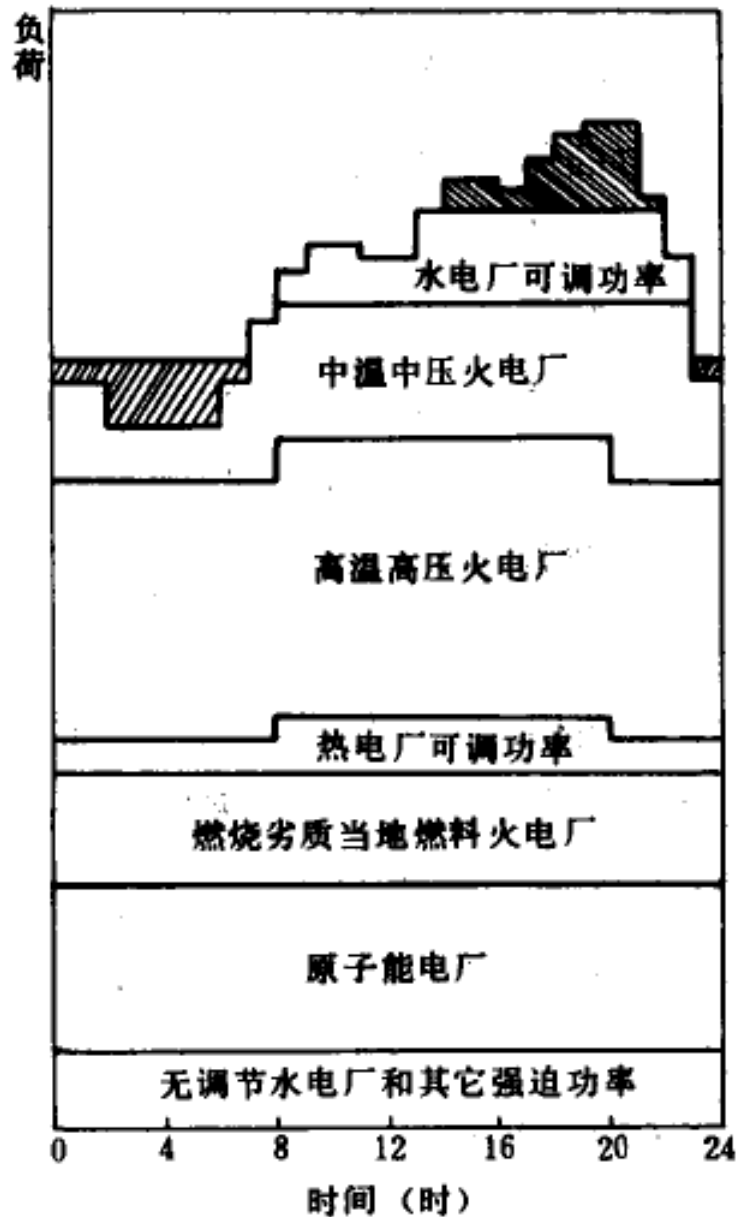
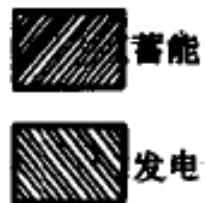
**基荷**：日负荷曲线最低点以下的部分，24小时内不变。

**高峰负荷**：基荷和最大负荷之间的部分，经常变动。

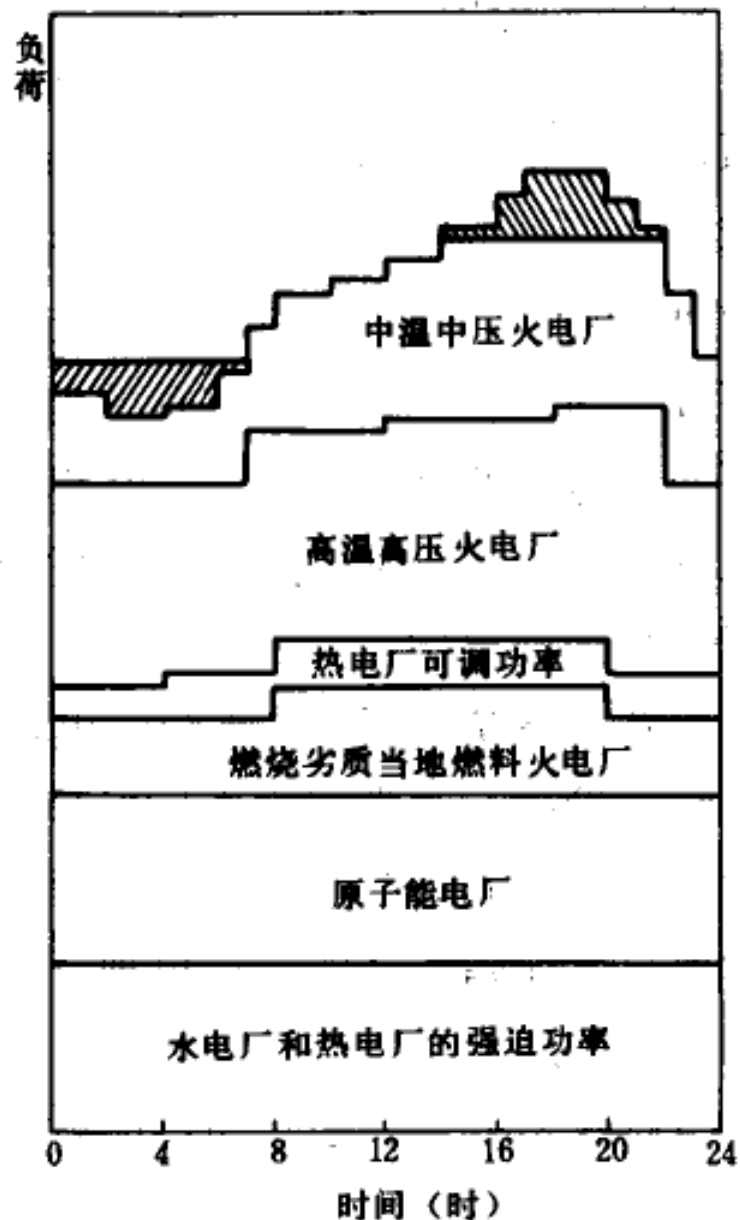


# 各类发电厂的组合原则

- 火电厂以承担基本不变的负荷为宜。高温高压电厂优先投入，中温中压电厂其次。
- 核电厂原则上应承担额定容量负荷
- 无调节水库水电厂的全部功率和有调节水库水电厂的强迫功率应首先投入
- 有调节水库水电厂的可调功率：丰水期优先投入；枯水期后投入
- 抽水蓄能电厂承担高峰负荷



(a) 枯水期



(b) 丰水期

# 各类发电厂的合理组合

---

## ■ 说明：

- 考虑发电厂的合理组合时，应兼顾供电可靠性、降低网损、维持电能质量和系统稳定性
- 负荷曲线的最高部位是调频厂的工作位置。

# 目录

---

- 第一节 电力系统有功功率的平衡
- 第二节 电力系统有功功率的最优分配
- ☞ 第三节 电力系统的频率调整
  - 3.1 频率调整的必要性
  - 3.2 电力系统有功 - 频率静态特性
  - 3.3 频率的一次、二次调整及相关计算

# 3.1 频率调整的必要性

- ❑ 互联交流电力系统在稳态运行时具有同一频率。当系统中出现有功功率不平衡时，如有功电源不足或负荷增长时，将会引起系统频率下降，反之，将造成频率升高。
- ❑ 频率变动对用电设备、发电厂和电力系统本身都会产生不利影响。
- ❑ 由于电力负荷的不确定性和多变性，为了保证频率质量（限制频率偏移在允许范围之内），必须不断调节有功功率电源的输出功率。这就是频率调整的内容。

保证频率质量的首要条件：系统中有充足的有功备用



# 频率变动所产生的不良影响

## 用电设备

- 频率变化导致电动机转速变化，影响产品质量
- 频率不稳定影响电子设备的正常工作

## 发电厂

- 频率变化造成汽轮机叶片振动异常
- 频率降低时，发电厂的风机、给水泵等辅机的效率降低，影响发电设备的正常运行
- 频率降低时，发电机定、转子温升增加

## 电力系统

- 低频运行时变压器铁耗和励磁电流增大
- 频率降低时，无功负荷增加，影响系统的无功平衡和电压水平
- 频率过低还可能造成频率崩溃而引发大面积停电

# 目录

---

- 第一节 电力系统有功功率的平衡
- 第二节 电力系统有功功率的最优分配
- ☞ 第三节 电力系统的频率调整
  - 3.1 频率调整的必要性
  - 3.2 电力系统有功 - 频率静态特性
  - 3.3 频率的一次、二次调整及相关计算



## 3.2 电力系统的有功频率静态特性

---

- 3.2.1 电源的有功频率静态特性
- 3.2.2 负荷的有功频率静态特性
- 3.2.3 电力系统稳态运行频率的确定

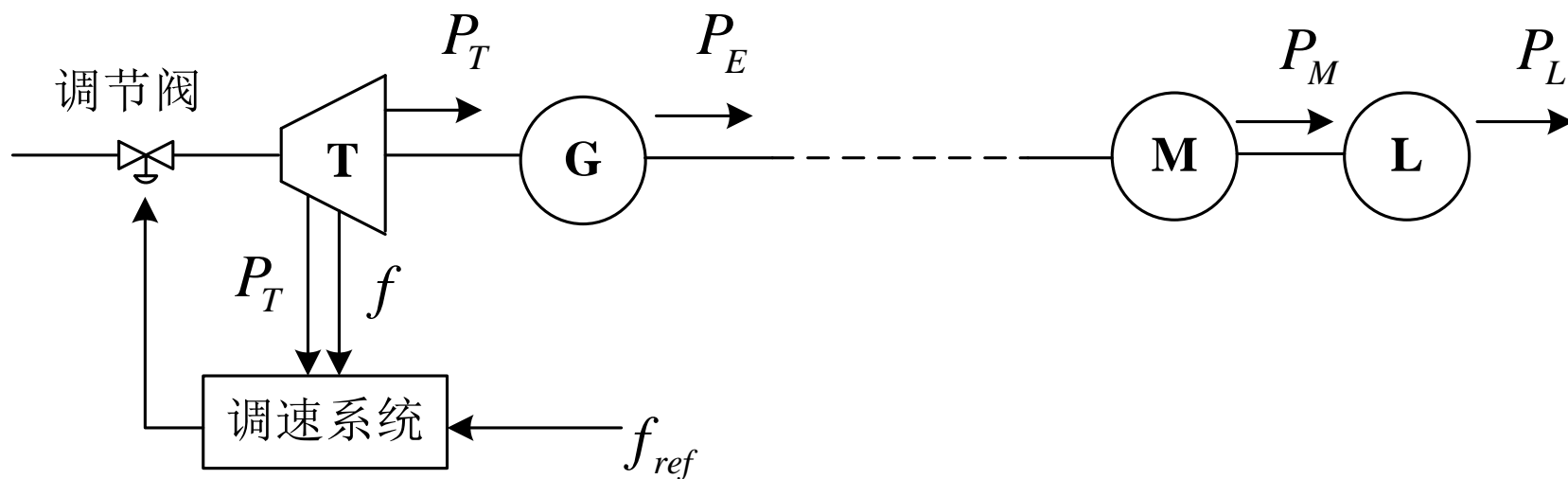


## 3.2.1 电源的有功频率静态特性

---

- ◆ 自动调速系统的工作原理
- ◆ 自动调速系统退出时电源的频率特性
- ◆ 自动调速系统投入时电源的频率特性
- ◆ 电源的频率特性参数

# 自动调速系统的工作原理



# 自动调速系统的工作原理

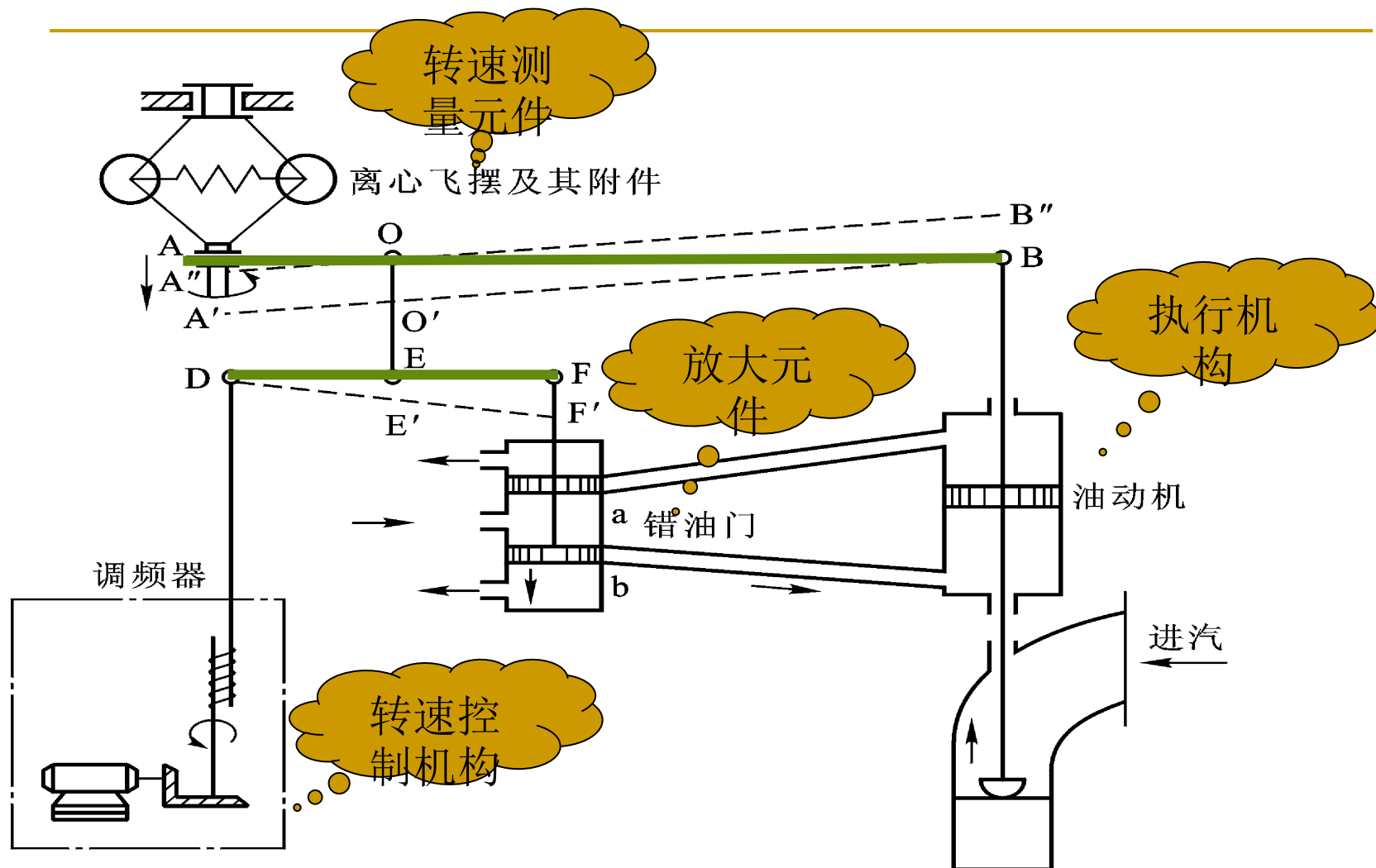
## ■ 离心飞摆式调速系统

- 一种最简单的调速系统(用机械装置测量转速，用液压装置作为执行机构)
- 工作原理 (p200, 图5-22)

$$P_E = P_T$$



$$f = f_0$$



# 离心飞摆式调速系统的工作原理

## 调速器工作过程

- 原动机主轴带动套筒，套筒带动飞摆转动
- 机组负荷增大，转速下降，飞摆向转轴靠拢，A点下移到A'点；
- 油动机活塞两边油压相等，B点不动，杠杆AB绕B点逆时针转动到A'B，使O点下降至O'；
- 调频器不动时，D点不动，E点下降至E'，杠杆DF绕D点顺时针转动到DF'，使F点下降至F'。



# 离心飞摆式调速系统的工作原理

## 调速器工作过程

- 错油门活塞下移使油管a、b的小孔开启，压力油经b进入油动机活塞下部，活塞上部的油经a流入错油门上部。
- 油动机活塞向上移动，使汽轮机的调节汽门或水轮机的导向叶片开度增大，增加进汽量或进水量。相应使机组的转速上升，A'点回升，提升O'点；同时，活塞上移，使杠杆A'B绕A'逆时针转动，也提升O'点。
- 当A'点回升到A'点，O'点回升O点，F'点回升F点时，使油管a、b的小孔重新堵住，油动机活塞停止移动。

# 离心飞摆式调速系统的工作原理

## 调速器工作过程

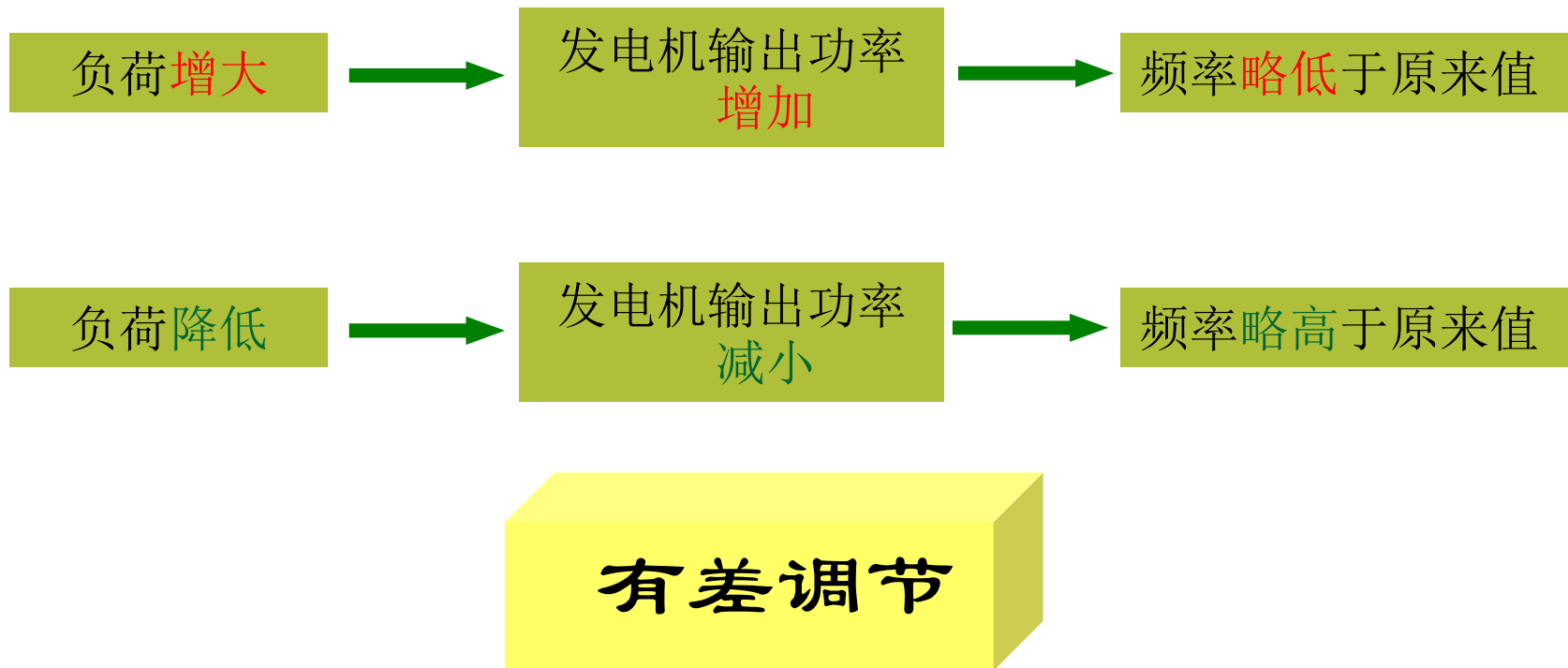
- 调节过程结束时，杠杆AB的位置为A''OB'。O点位于原位置，B'的位置较B高，A''的位置较A略低。相应的进汽量或进水量较原来多，机组转速较原来（负荷未增加时）略低。





# 离心飞摆式调速系统的工作原理

## 调速器工作特点（一次调频特点）



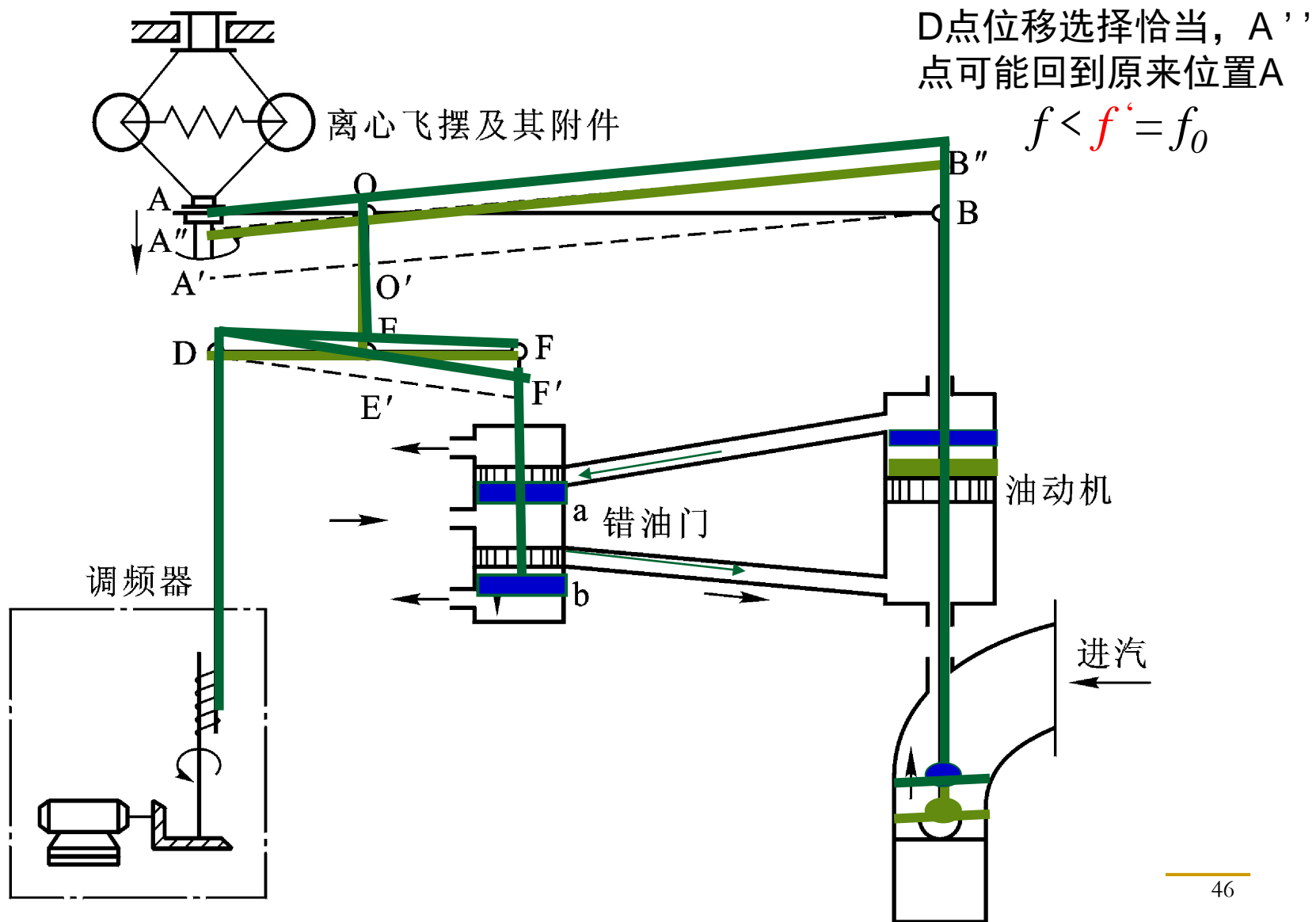
调速器的一次频率调整，一定是有差调节（负荷变动时，原动机的转速或频率将有所变动—随负荷增大而降低）

# 离心飞摆式调速系统的工作原理

## 调频器工作过程

- 调频器转动蜗轮、蜗杆，抬高D点，杠杆DF绕O点顺时针转动；
- 错油门活塞再次下移开启小孔，在油压作用下，油动机活塞再次向上移动，进一步增加进汽或进水量。机组转速上升，飞摆使A点由A''点上升。
- 油动机活塞向上移动时，杠杆AB绕A逆时针转动，带动O、E、F点上移，再次堵塞错油门小孔，结束调节过程。

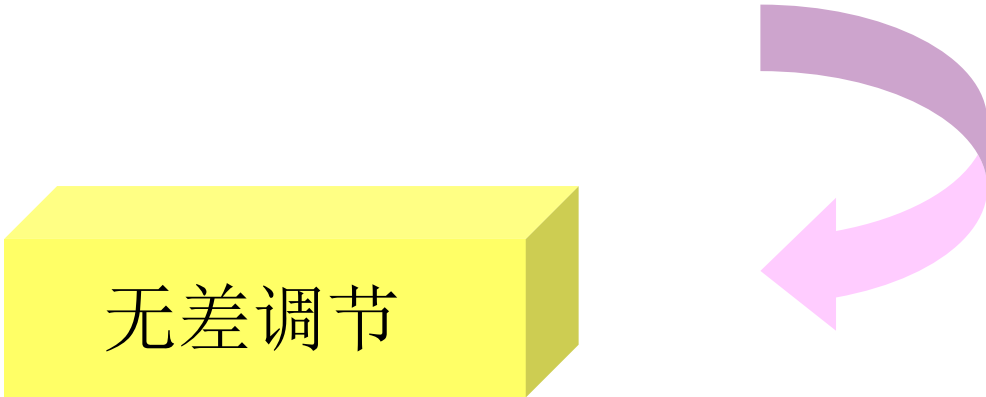
$$P_E > P_T \quad \rightarrow \quad f < f_0$$



# 离心飞摆式调速系统的工作原理

## 调频器工作特点（二次调频特点）

### 调频器完成二次调整



无差调节

调频器可以实现无差调节（负荷变动时，原动机的转速或频率保持不变）



## 3.2.1 电源的有功频率静态特性

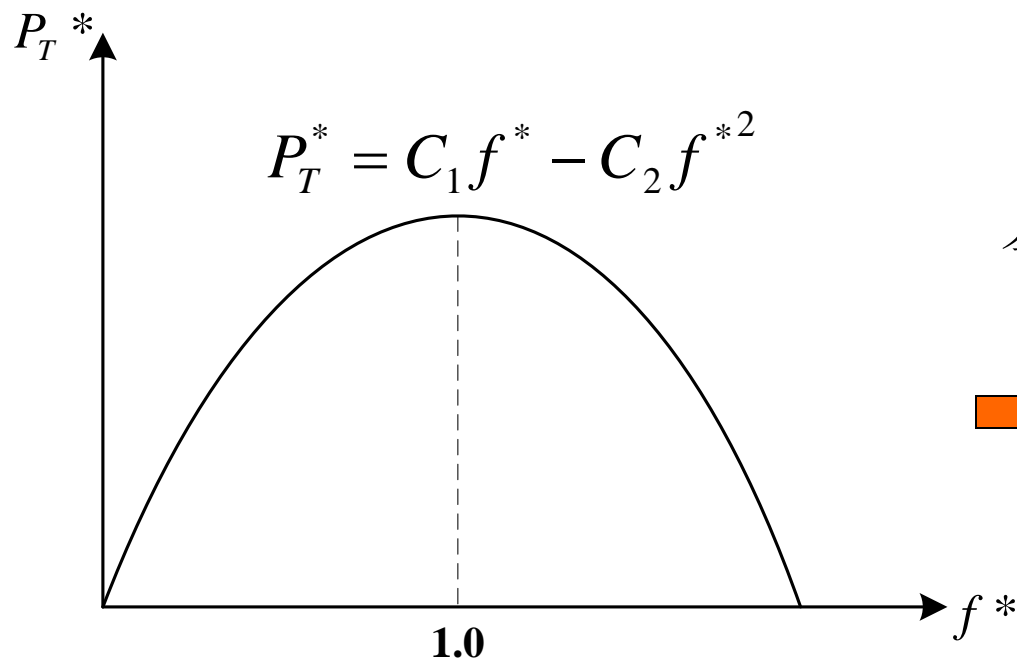
---

- ◆ 自动调速系统的工作原理
- ◆ 自动调速系统退出时电源的频率特性
- ◆ 自动调速系统投入时电源的频率特性
- ◆ 电源的频率特性参数



# 自动调速系统退出时电源的频率特性

- 汽、水门开度恒定



$$\text{令 } \frac{dP_T^*}{df^*} = C_1 - 2C_2 f^* = 0$$

→ 当  $f^* = 1$  时，有  $C_1 = 2C_2$

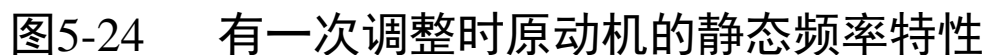


## 3.2.1 电源的有功频率静态特性

---

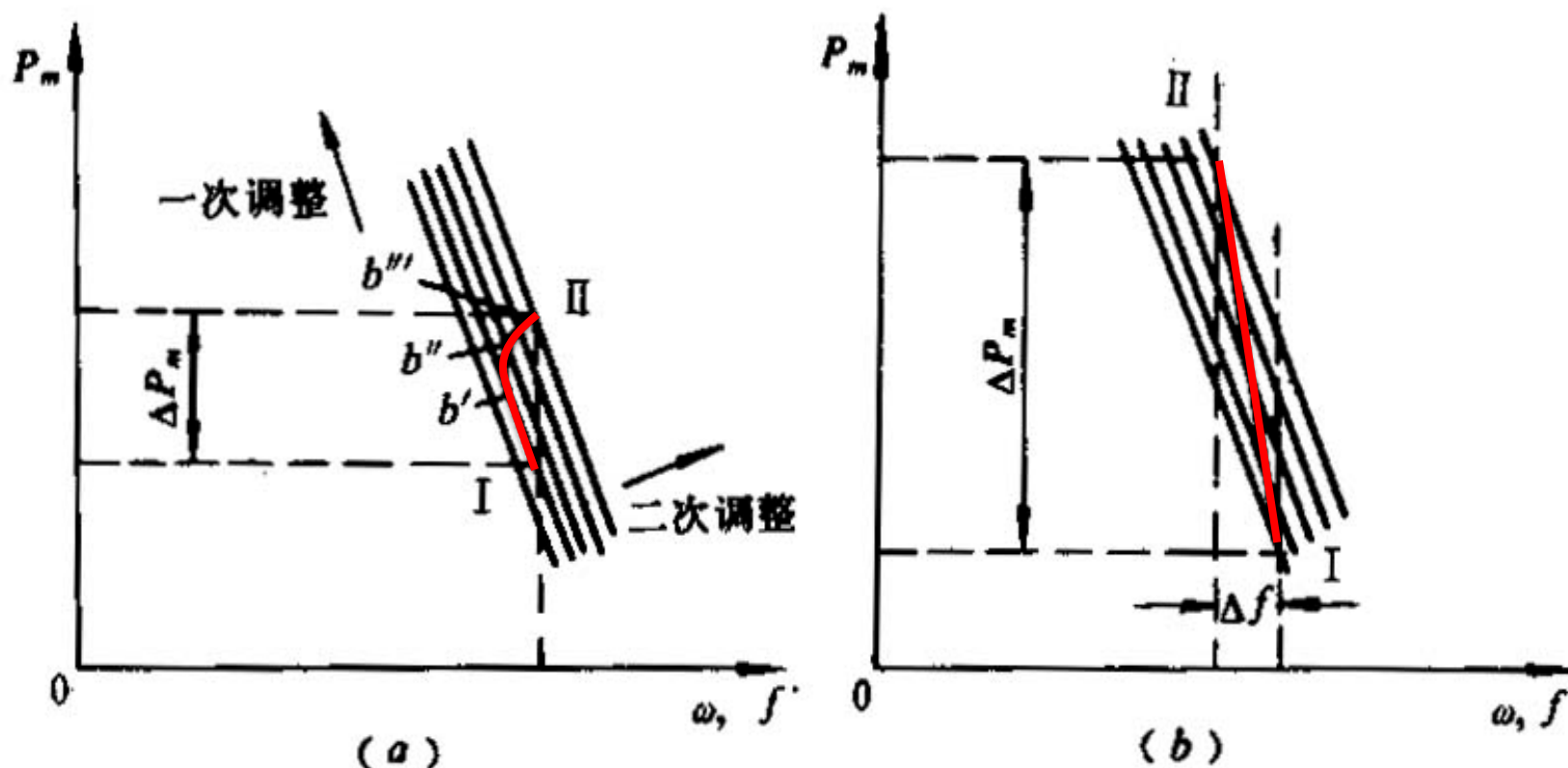
- ◆ 自动调速系统的工作原理
- ◆ 自动调速系统退出时电源的频率特性
- ◆ 自动调速系统投入时电源的频率特性
- ◆ 电源的频率特性参数

## ■ 有一次调整（调速器）时原动机的静态频率特性



# 自动调速系统投入时电源的频率特性

## ■ 有二次调整（调频器）时原动机的静态频率特性



调频器的作用(无差调节)

调频器的作用(有差调节)

图5-25 有二次调整时原动机的静态频率特性



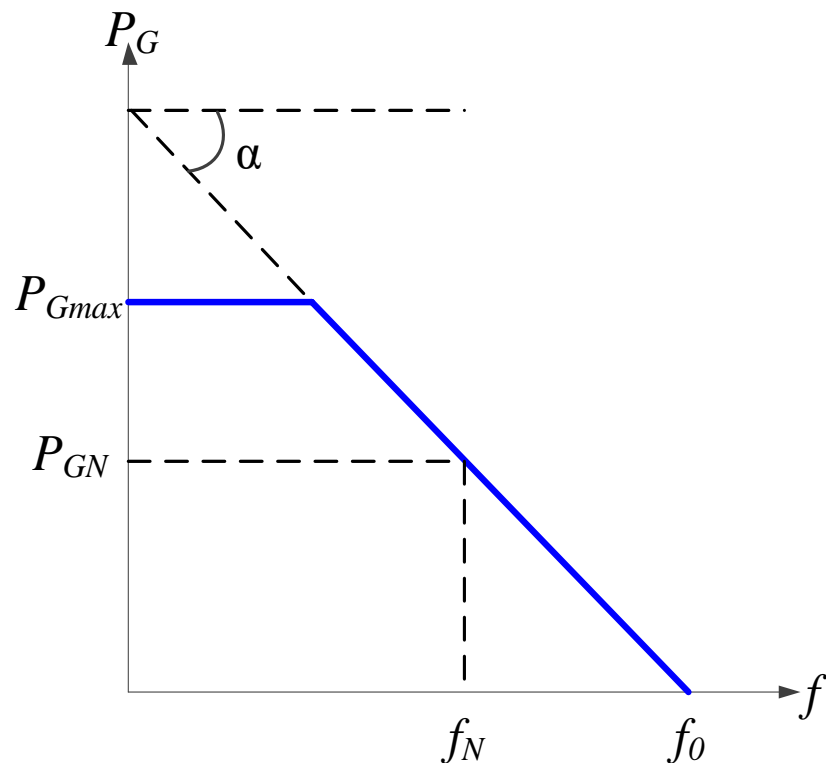
## 3.2.1 电源的有功频率静态特性

---

- ◆ 自动调速系统的工作原理
- ◆ 自动调速系统退出时电源的频率特性
- ◆ 自动调速系统投入时电源的频率特性
- ◆ 电源的频率特性参数

# 电源的频率特性参数

## ■ 发电机组频率特性参数的含义



➤ 发电机组的**单位调节功率**

$$K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} = \tan \alpha$$

以MW/Hz或MW/ (0.1Hz) 为单位。

➤ 发电机组的**调差系数**

$$\sigma = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G}$$

$K_G$ 、 $\sigma$ 由调速系统的控制参数决定，**可以整定**，运行中保持不变

# 电源的频率特性参数

## ■ 发电机组频率特性的标么值参数

### □ 基准值

$P_{GN}$  : 发电机的额定功率

$f_N$  : 额定频率, 50Hz

### □ 标么值单位调节功率

$$K_{G^*} = -\frac{\Delta P_{G^*}}{\Delta f_*} = -\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N} = K_G \frac{f_N}{P_{GN}}$$

### □ 标么值调差系数

$$\sigma_* = -\frac{\Delta f_*}{\Delta P_{G^*}} = \sigma \frac{P_{GN}}{f_N} = \frac{1}{K_{G^*}}$$

百分数调差系数  $\sigma\% = \sigma_* \times 100$

# 电源的频率特性参数

- 工程上常将以发电机组自身额定值为基准的标么值参数整定为**常数**，一般，整定如下：

	$\sigma\%$	$K_{G^*}$
汽轮发电机组	3~5	33.3~20
水轮发电机组	2~4	50~25





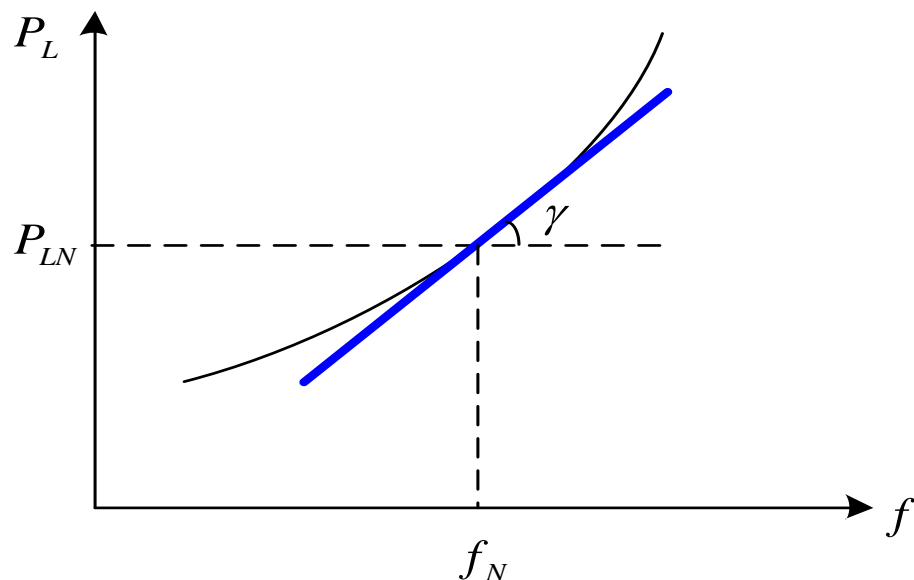
## 3.2 电力系统的有功频率静态特性

---

- 3.2.1 电源的有功频率静态特性
- 3.2.2 负荷的有功频率静态特性
- 3.2.3 电力系统稳态运行频率的确定

# 负荷的静态频率特性

## ■ 负荷的频率特性(线性化) $P_L = P_{L0} + K_L f$



- 综合负荷的额定功率  $P_{LN}$   
 $P_{LN}^{\text{def}}$  =  $f_N$  时负荷吸收的有功功率
- 负荷的单位调节功率

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} = \tan \gamma$$

**物理意义：**反映系统频率变化时负荷吸收功率的变化，表征了负荷对频率的自然调节作用。

- 负荷的频率特性取决于负荷的组成和性质,不可整定
- 通常在额定频率处将负荷的频率特性线性化

# 负荷的静态频率特性

## □ 标么值负荷单位调节功率

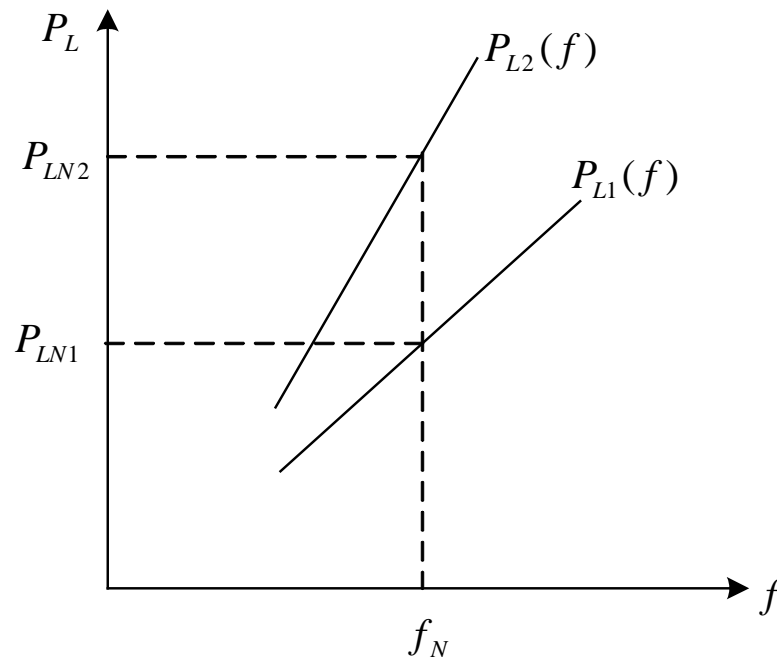
$$K_{L^*} = \frac{\Delta P_{L^*}}{\Delta f^*} = \frac{\Delta P_L / P_{LN}}{\Delta f / f_N} = K_L \frac{f_N}{P_{LN}}$$

- $K_{L^*}$ 不能整定，当负载的性质相同时， $K_{L^*}$ 与负荷容量无关
- 电力系统综合负荷 $K_{L^*}$ 大致为1.5

若负荷性质相同，但容量不同

$$\frac{K_{L1^*}}{K_{L2^*}} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{K_{L1}}{K_{L2}} \neq 1$$

(两条负荷特性曲线不平行)





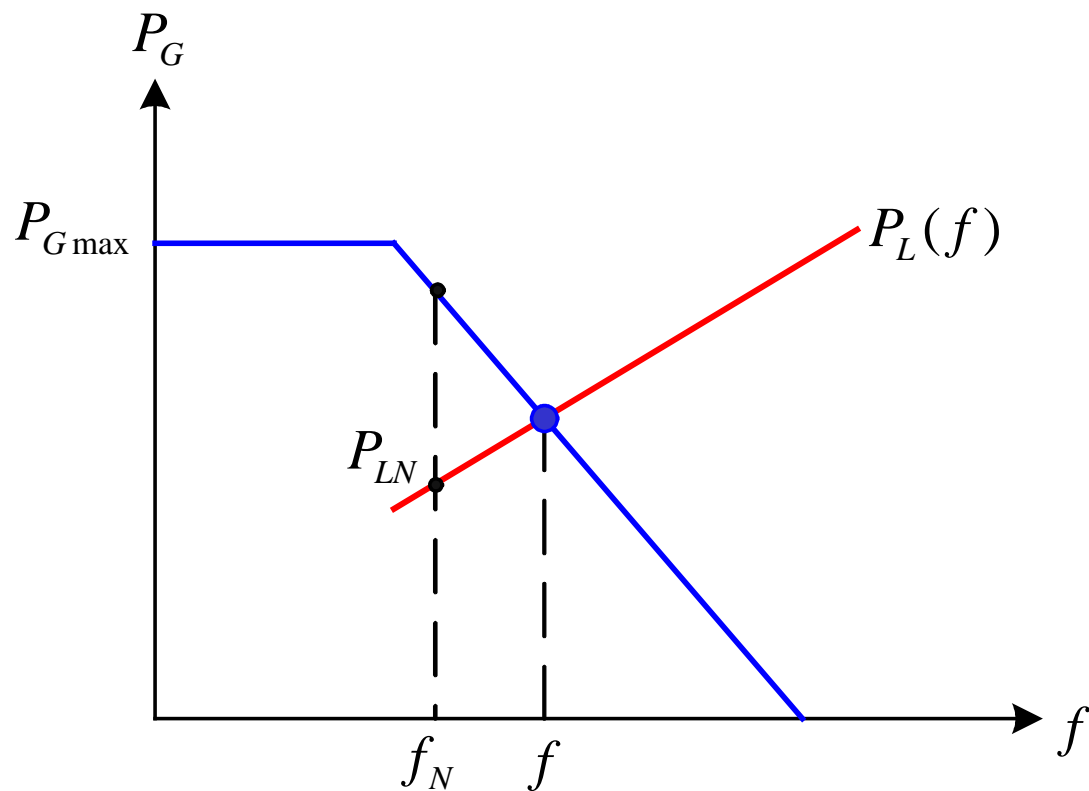
## 3.2 电力系统的有功频率静态特性

---

- 3.2.1 电源的有功频率静态特性
- 3.2.2 负荷的有功频率静态特性
- 3.2.3 电力系统稳态运行频率的确定

# 电力系统稳态运行频率的确定

- 由电源（原动机）频率特性和负荷频率特性的交点确定。



# 目录

---

- 第一节 电力系统有功功率的平衡
- 第二节 电力系统有功功率的最优分配
- ☞ 第三节 电力系统的频率调整
  - 3.1 频率调整的必要性
  - 3.2 电力系统有功 - 频率静态特性
  - 3.3 频率的一次、二次调整及相关计算

# 频率的一次调整

- 含义：负荷的功率变化时，由当前负荷的单位调节功率和发电机组的单位调节功率共同决定的频率的自动调整。

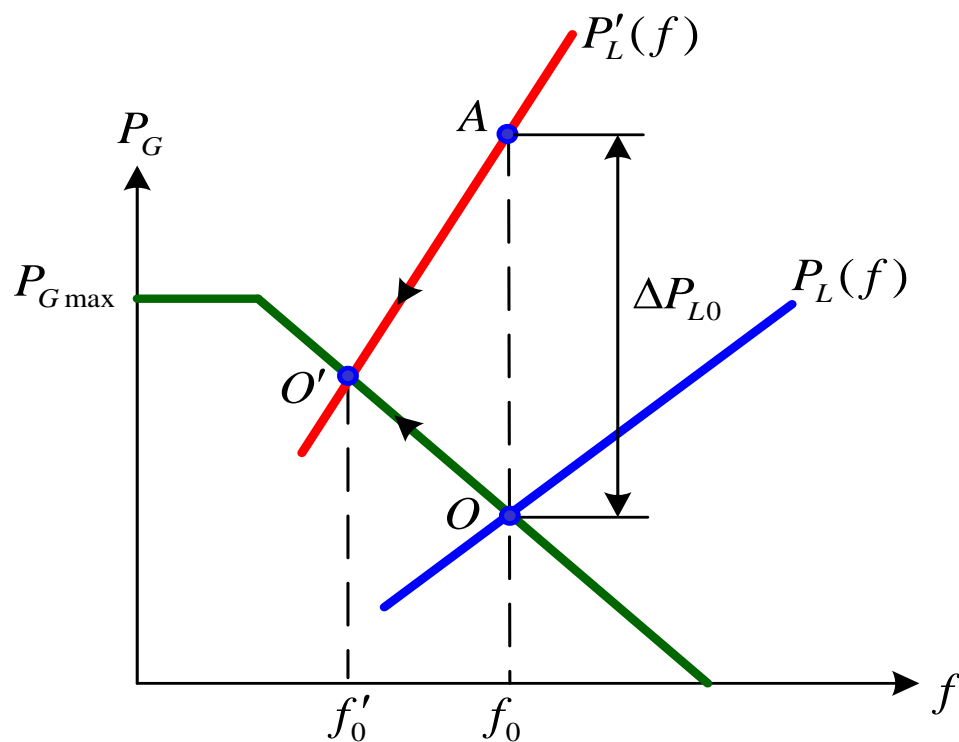
- 一次调频的计算

初始状态： $O$ 点，频率 $f_0$

状态变化：负荷功率突增 $\Delta P_{L0}$

新稳态： $O'$ 点，频率 $f'_0$

问题： $\Delta f = f'_0 - f_0 = ?$



# 频率的一次调整

$\Delta AOO'$ 中:

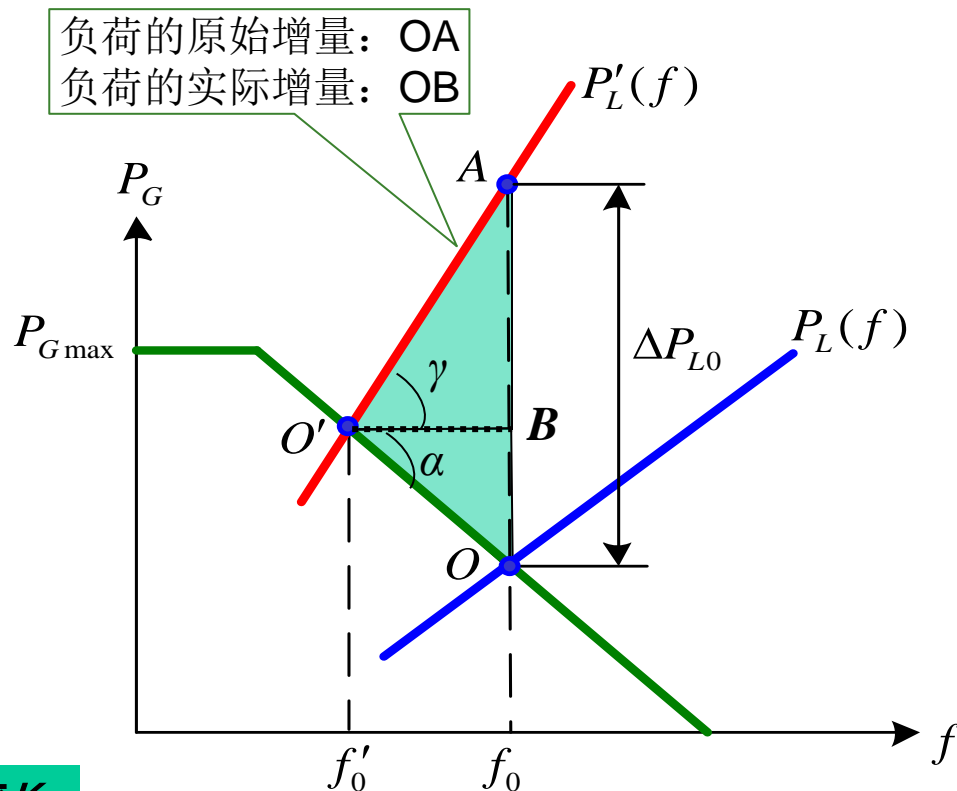
$$\begin{aligned}\overline{OA} &= \overline{OB} + \overline{BA} \\ &= \overline{O'B} \operatorname{tg} \alpha + \overline{O'B} \operatorname{tg} \gamma \\ &= \overline{O'B} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{L0} &= (f_0 - f'_0)(K_G + K'_L) \\ &= -\Delta f (K_G + K'_L)\end{aligned}$$



系统的单位调节功率  $K_S$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{L0}}{K_G + K'_L} \Rightarrow \Delta f = -\frac{\Delta P_L(f_0)}{K'_S} = -\frac{\text{原频率下的负荷增量}}{\text{当前系统的单位调节功率}}$$





# 频率的一次调整

## ■ 说明：

- 当系统中有  $n$  台发电机参加一次调频

$$K_{GN} = \sum_{i=1}^n K_{Gi}$$

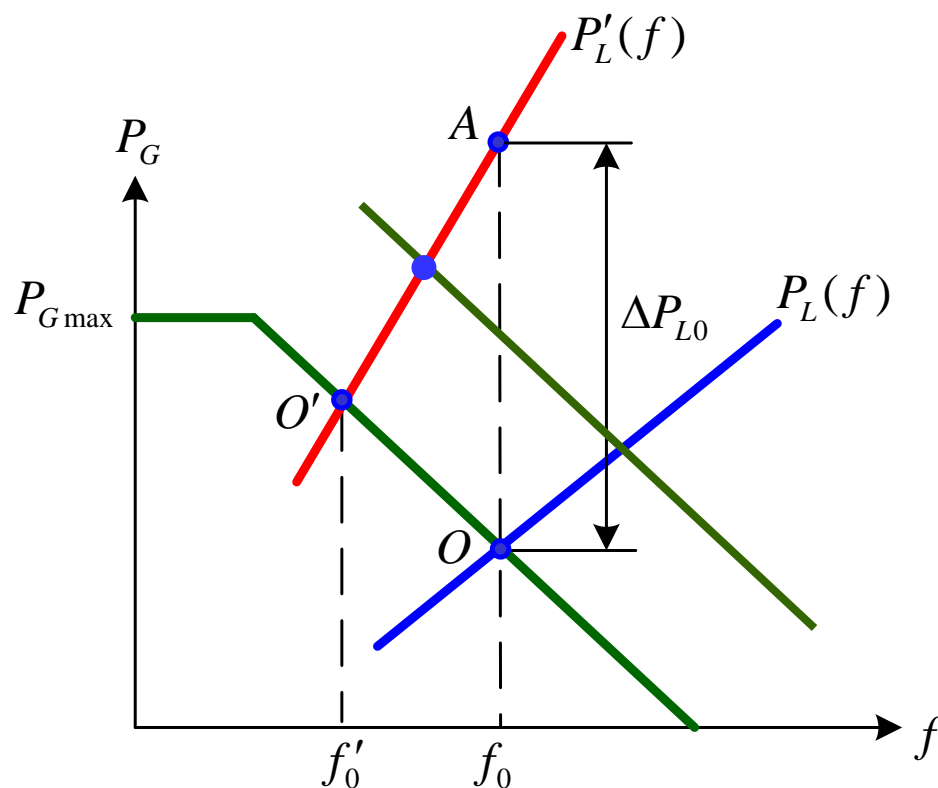
全系统发电机的等值单位调节功率（有名值）

$$K_{GN^*} \neq \sum_{i=1}^n K_{Gi^*}$$

- 当第  $i$  台发电机不参加一次调频，或已满载而负荷增加时，则  $K_{Gi} = 0$
- 机组的单位调节功率不能过大，因此一次调节有差

# 频率的二次调整

- 含义：在一次调整的基础上，利用调频器使发电机组的频率特性上下平移而产生的调节作用



# 一、二次调频的综合计算

一次调整:  $O \rightarrow O'$

二次调整:  $O' \rightarrow O''$

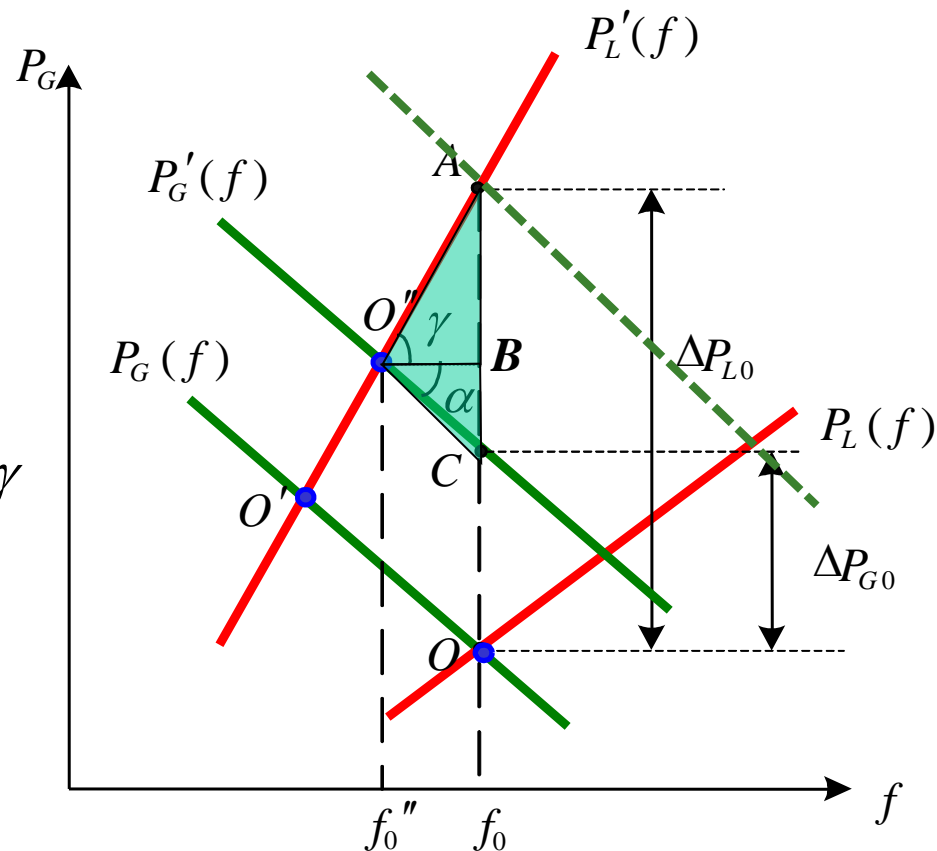
问题:  $\Delta f = f_0'' - f_0 = ?$

$$\begin{aligned} \Delta A O'' C \text{ 中: } \overline{CA} &= \overline{CB} + \overline{BA} \\ &= \overline{O''B} \tan \alpha + \overline{O''B} \tan \gamma \\ &= \overline{O''B} (\tan \alpha + \tan \gamma) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Delta P_{L0} - \Delta P_{G0} &= (f_0 - f_0'')(K_G + K_L') \\ &= -\Delta f \cdot K'_S \end{aligned}$$

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0}}{K'_S} = - \frac{\text{原频率下的系统功率缺额}}{\text{当前系统的单位调节功率}}$$



# 频率调整算例

- **例：**某系统发电机组的容量为3000MW，调差系数 $\sigma\%=4$ （基准为3000MW和50Hz）。在某一频率下，若负荷突然增加500MW，在无二次调频作用下，系统频率下降0.2Hz。

（1）计算负荷的单位调节功率。

（2）为减小频率偏移，调频器动作。若希望将频率偏移减少到0.1Hz，试求二次调频作用下，发电机组应增发的功率。

# 频率调整算例

## ■ 提示：

- 进行一、二次调频计算时，建议采用有名值的单位调节功率
- 负荷的标么单位调节功率不能整定，综合负荷的标么值单位调节功率 $K_{L*}$ （一般为1.5左右），当负荷的额定功率（50Hz时的功率）变化时， $K_{L*}$ 不变， $K_L$ 变化
- 若根据已知条件不能确定负荷额定功率变化后的单位调节功率 $K'_L$ ，则可近似认为 $K'_L = K_L$

# 频率调整算例

解：(1) 由  $\sigma\%=4$  可知： $\sigma_*=0.04$

$$\text{则 } K_{G*} = \frac{1}{\sigma_*} = \frac{1}{0.04} = 25$$

$$K_G = K_{G*} \frac{P_{GN}}{f_N} = 25 \times \frac{3000}{50} = 1500 \cdot \text{MW/Hz}$$

$$\text{由题意, } \Delta f = -\frac{\Delta P_{L0}}{K_G + K'_L} = -\frac{500}{1500 + K'_L} = -0.2$$

$$\therefore \text{故: } K'_L = 1000 \cdot \text{MW/Hz}$$

(2) 设二次调频发电机增发功率为  $\Delta P_{G0}$ ，则有：

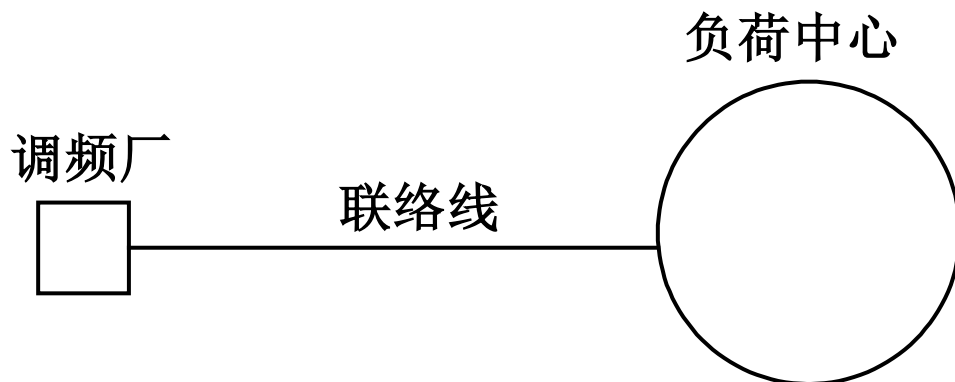
$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0}}{K_G + K'_L} = -\frac{500 - \Delta P_{G0}}{1500 + 1000} = -0.1$$

$$\text{故: } \Delta P_{G0} = 500 \cdot \text{MW}$$

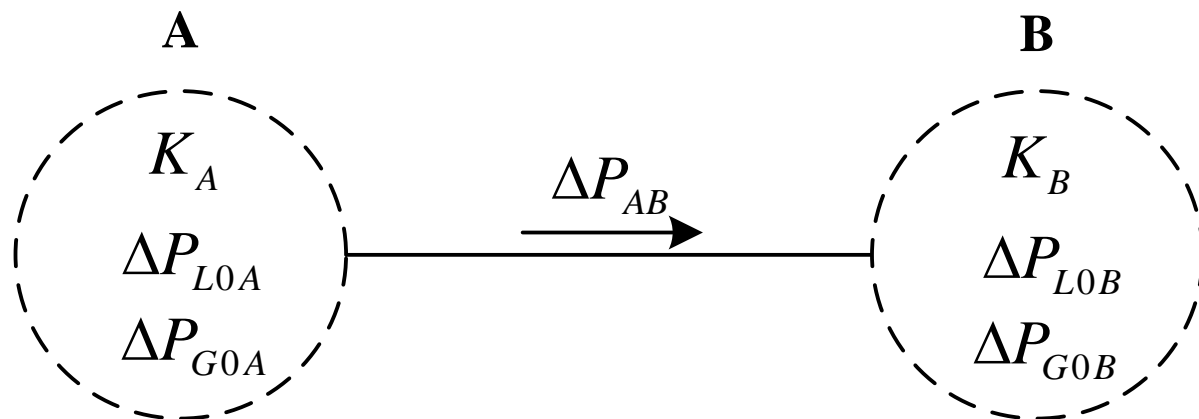
# 互联系统联络线上的功率计算

## □ 问题的提出：

- 二次调频时，**负荷的原始增量**主要由**调频器**作用下的发电机组的增发功率来平衡，即主要由**调频厂**承担。
- 当调频厂远离负荷中心，可能使调频厂和系统其它部分相联的联络线上的功率超过允许值。



# 互联系统联络线上的功率计算



- 初始状态:  $P_{AB}$
- 运行状态的变化 (通常不计  $K_L$  的变化) :
  - A系统: 负荷原始增量  $\Delta P_{L0A}$   
发电机二次调频增发功率  $\Delta P_{G0A}$
  - B系统: 负荷原始增量  $\Delta P_{L0B}$   
发电机二次调频增发功率  $\Delta P_{G0B}$
- 问题:  $\Delta P_{AB} = P'_{AB} - P_{AB} = ?$



# 互联系统联络线上的功率计算

■ **分析：**关键在于计算频率的增量  $\Delta f$

■ **解：①** 计算  $\Delta f$

A系统的原始功率缺额：  $\Delta P_A = \Delta P_{L0A} - \Delta P_{G0A}$

B系统的原始功率缺额：  $\Delta P_B = \Delta P_{L0B} - \Delta P_{G0B}$

将两互联系统视为一个合成系统

合成系统的原始功率缺额：  $\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B$

合成系统的单位调节功率：  $K_S = K_A + K_B$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K_S} = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} \quad (5-50)$$

A、B系统互联，则  $\Delta f_A = \Delta f_B = \Delta f$

# 互联系统联络线上的功率计算

## 2 计算联络线功率 $\Delta P_{AB}$

对A系统，联络线功率 $\Delta P_{AB}$  相当于负荷功率增量

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



$$\Delta P_{AB} = -K_A \Delta f - \Delta P_A = K_A \frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} - \Delta P_A = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B}$$

或者：对B系统，联络线功率相当于发电机增发功率

$$\Delta P_B - \Delta P_{AB} = -K_B \Delta f$$

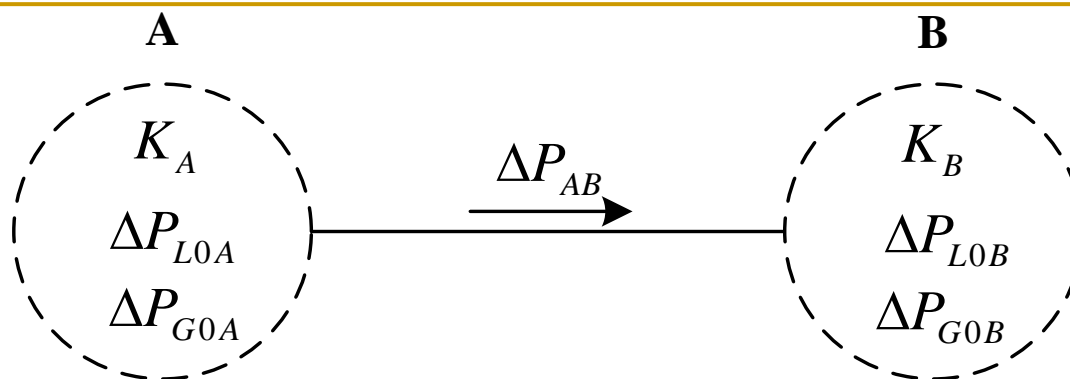


$$\Delta P_{AB} = \Delta P_B + K_B \Delta f = \Delta P_B - K_B \frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B}$$

(5-51)

# 互联系统联络线上的功率计算

## ■ 讨论:



$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B}, \quad \Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B}$$

- 若A系统功率缺额  $\Delta P_A = 0$  , 则A→B的功率增大
- 若B系统功率缺额  $\Delta P_B = 0$  , 则A→B的功率减小
- 若B系统的功率缺额完全由A系统增发功率补偿  $\Delta P_B = -\Delta P_A$   
则  $\Delta f = 0$ ,  $\Delta P_{AB} = -\Delta P_A = \Delta P_B$

# 调频厂的选择

- 调频厂：担负二次调频任务的发电厂
- 调频厂应满足的基本要求：
  - 调整容量大
  - 调整速度快
  - 调整范围内的经济性能好
  - 调整时不至于引起系统内部或系统间联络工作困难
- 选择原则：
  - 一般选择水电厂作为调频厂
  - 当没有水电厂或丰水期水电厂不宜承担调频任务时，选择中温中压火电厂为调频厂

# 本章小结

---

- 三类负荷变动、三种频率调整
- 各种有功备用的含义
- 各类发电厂的运行特点和组合顺序
- 发电机组的**频率特性**：单位调节功率、调差系数（有名值、标么值）的含义和计算
- 负荷的**频率特性**：单位调节功率（有名值、标么值）的含义
- 频率**一次调整**、**二次调整**的原理、含义和计算（含互联系统联络线功率计算）