

第一章 电力系统概述 – 续

(Introduction to Power Systems)



电力系统分析课程 和电路分析课程最大的区别

城头变幻大王旗
电流让位复功率

§4 交流电路的功率和复功率

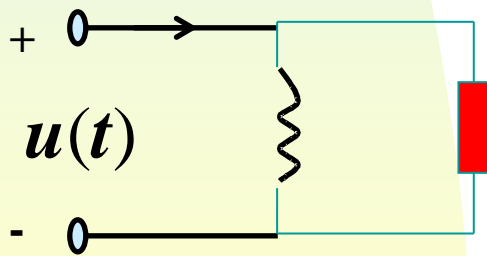
一、电力系统为何用功率？

能量系统，基于能量的分析方法

怎么分析？给定边界条件，求解内部状态。电力系统分析给的边界条件是**发电/负荷**

发电/负荷均以**功率**和**能量**计量，方便算钱和控制

复功率是电力系统中最重要概念之一

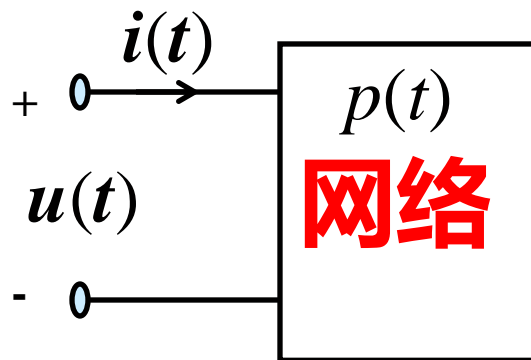
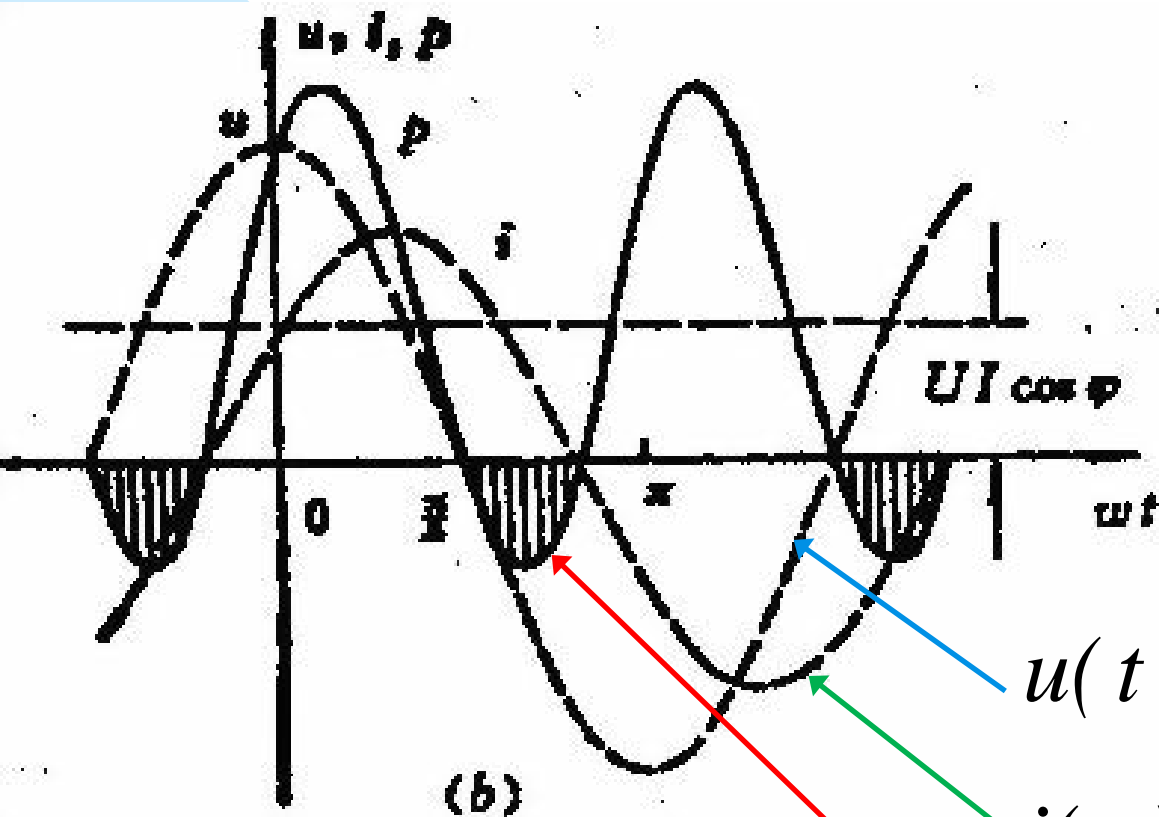


交流电路

从能量观点，我们观察了什么物理现象？

如果我们是前辈先贤，会引入什么物理量来描述之？

二、单相瞬时功率



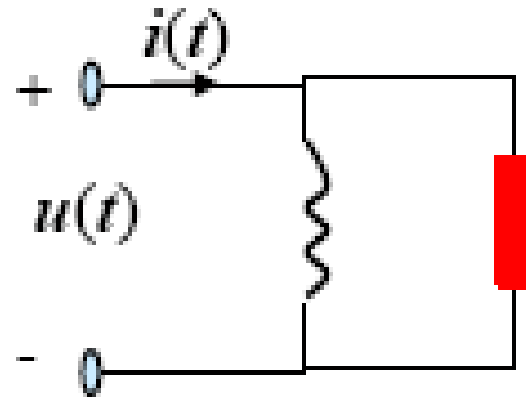
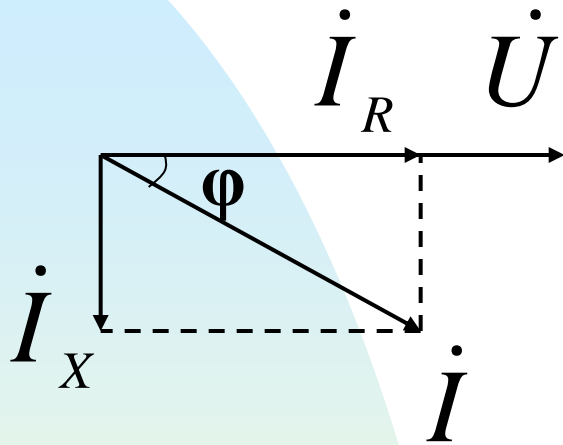
$$u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi)$$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

观察： p 的频率和 u, i 相同么？
为什么？会带来什么问题？

分析功率组成： 定义电流的有功、无功分量



$$i(t) = i_R(t) + i_X(t)$$

有功分量

$$i_R(t) = \sqrt{2}I \cos \varphi \cos \omega t$$

无功分量

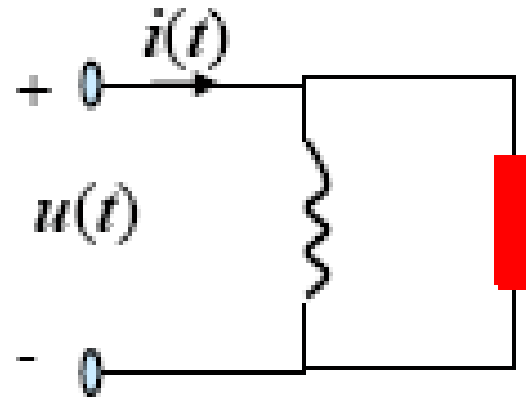
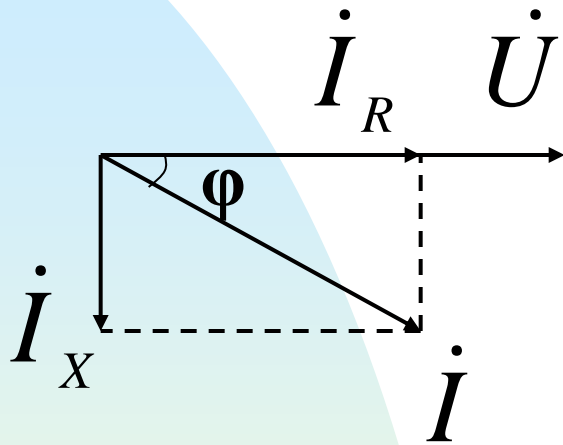
$$i_X(t) = \sqrt{2}I \sin \varphi \cos(\omega t - 90^\circ)$$

幅值

角度

分析功率组成：

将功率也分解成有功与无功分量



$$i(t) = i_R(t) + i_X(t)$$

$$p(t) = u(t)[i_R(t) + i_X(t)] = p_R(t) + p_X(t)$$

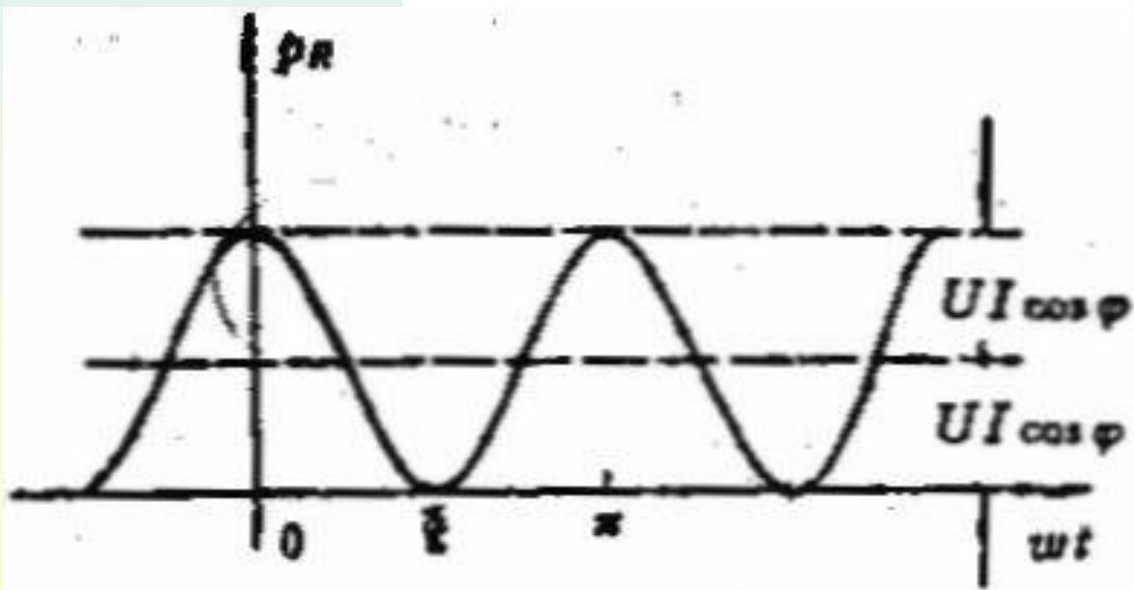
分解功率

1、有功分量

$$\begin{cases} u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t \\ i_R(t) = \sqrt{2}I \cos \varphi \cos \omega t \end{cases}$$

有功分量： $p_R(t) = UI \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t)$

$p_R(t)$ 由 $u(t)$ 与 $i_R(t)$ 产生的**瞬时功率**，**频率** 2ω ，**始终** ≥ 0 ，**均值** $UI \cos \varphi$ ，是无源网络中**等效电阻的耗能速率**（物理意义）（选什么做核心特征？）



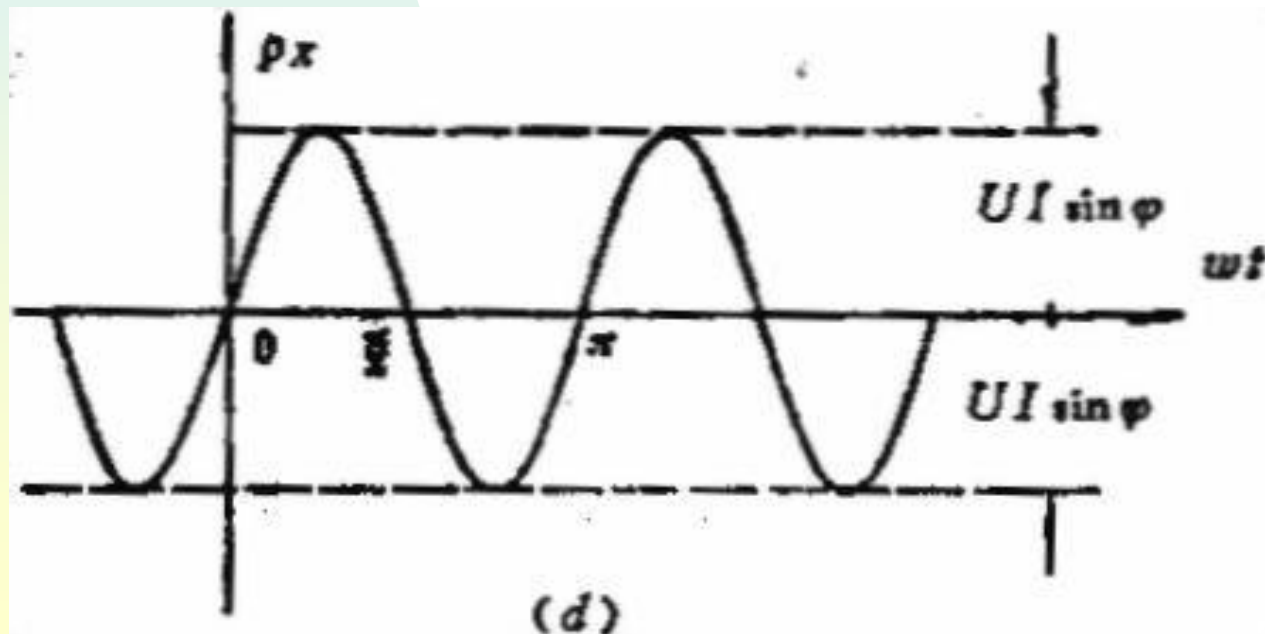
请考虑纯电
阻、纯电抗、
纯电容网络
的功率？

2、功率无功分量

$$\begin{cases} u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t \\ i_x(t) = \sqrt{2}I \sin \varphi \cos(\omega t - 90^\circ) \end{cases}$$

无功分量： $p_x(t) = UI \sin \varphi \sin 2\omega t$

$p_x(t)$ 由 $u(t)$ 与 $i_x(t)$ 产生的**瞬时功率**，**频率** 2ω ，**均值** $=0$ ，**峰值** $UI \sin \varphi$ ，是无源网络中**等效电抗与外电源的电能量交换速率**（物理意义）（选什么做核心特征？）



请考虑纯电
阻、纯电抗、
纯电容网络
的功率？

三、单相有功和无功功率

(定义物理量来描述对应的物理现象)

有功功率 P 定义为 $p_R(t)$ 的均值(关键特征):

$$P = UI \cos \varphi$$

无功功率 Q 定义为 $p_X(t)$ 的峰值(关键特征):

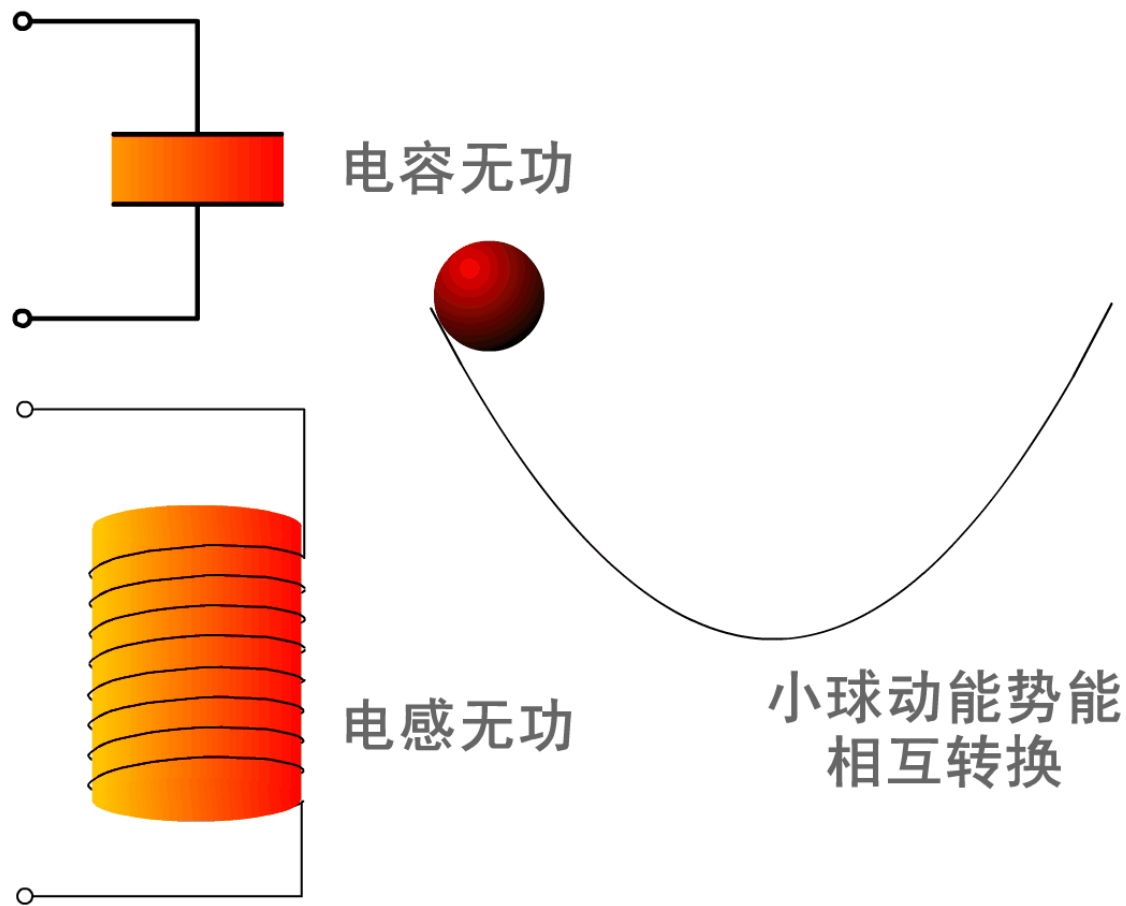
$$Q = UI \sin \varphi$$

P 和 Q 不是交变的! 是从交变瞬时功率中提取出来的特征量

P 物理意义: 无源网络消耗的功率均值。

Q 物理意义: 无源网与外界交换能量的能力大小, 交换功率峰值, 均值为零, 实际未消耗, 描述无源网电感和电容存储和释放场能现象。

如何进一步理解Q?



电网需要Q吗？无功=无用么？

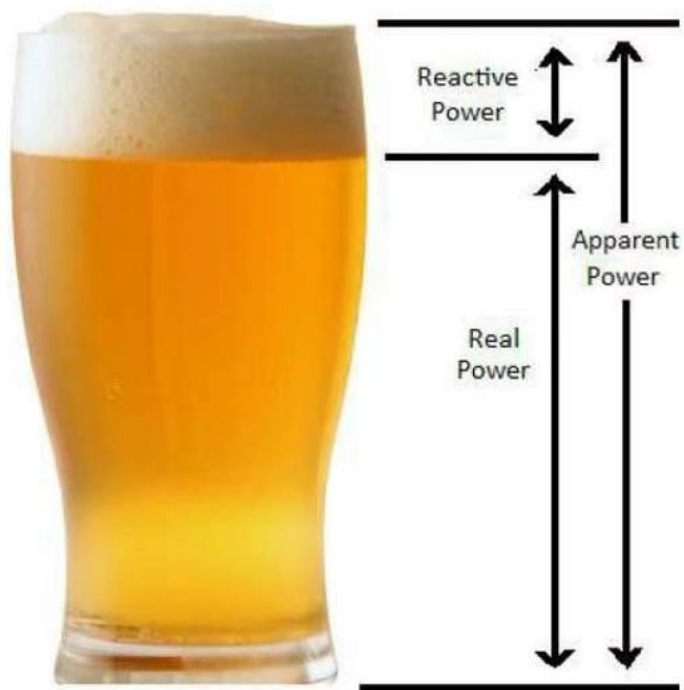
电网设备和负载中都包含了电感类（或电容）的储能元素，在交变电压电流作用下，一定有无功分量出现。

因此输送有功的同时，必然附着着无功。既然无功没有真的做功，那么这个无功被用来做了什么？

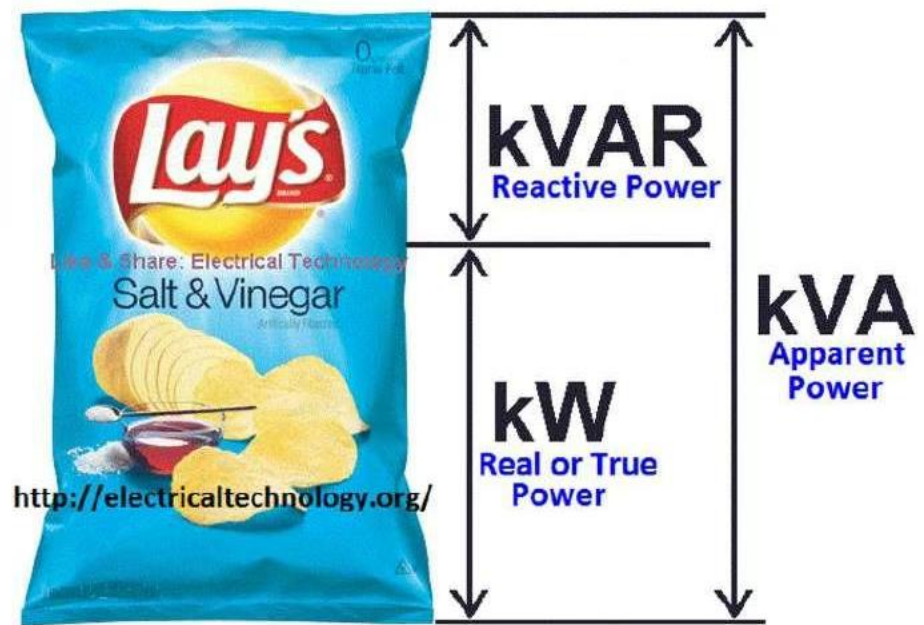
交流系统能够正常运行的基础——要**建立并维持一个支撑系统运行的磁场**，然后才能正常工作，对外做功。

想一个形象的例子来说明无功的价值？

一些关于无功的形象比喻



Source: www.madamenrg.wordpress.com



Source: www.acpowereng.weebly.com

一些关于无功的形象比喻



注意区分感性无功和容性无功

网络若是电感性的，则 $Q > 0$ ，习惯上认为网络“吸收”感性无功，是“**无功负荷**”。

网络若是电容性的，则 $Q < 0$ ，习惯上认为网络“发出”感性无功，是“**无功电源**”。

(**“吸收” 感性** (或容性) 无功功率相当于
“发出” 容性 (或感性) 无功功率)


$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

感受到了一种“暗示”么？

四、如何引入复功率？

视在功率 S 定义为 $u(t)$ 与 $i(t)$ 有效值之积：

$$S = UI$$

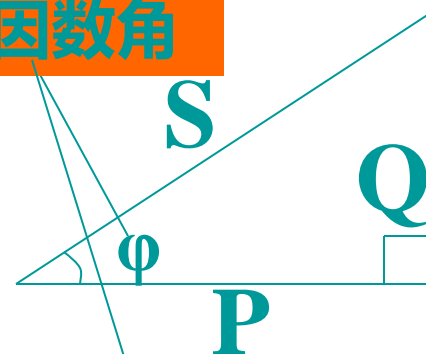
带来数学上的方便：功率三角形

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

由功率三角形，可引入复功率概念，用 \dot{S} 表示：

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \dot{U} \hat{I} = UI \angle \delta_u - \delta_i = UI \angle \varphi \\ &= UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi \\ &= P + jQ\end{aligned}$$

功率因数角



四、如何引入复功率？

交变瞬时量（物理真实）

$$p(t) = u(t)i(t) \quad \left\{ \begin{array}{l} p_R(t) \\ p_X(t) \end{array} \right.$$

特征量

$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

复功率

$$\dot{S} = P + jQ$$

$$\dot{U} \quad \dot{I}$$

相量

$$\dot{S} = \dot{U} \hat{I}$$

复功率只是一个“**数学**”定义，但是巧妙且重要！

引入复功率的好处？

物理意义：功率三角形关系的复数形式

实部是有功功率P

虚部是无功功率Q

幅角是功率因数角 φ

模是视在功率S

计算方便：可以直接使用电压电流相量来计算得到复功率！在电路计算中，**复功率可以相加（要满足什么条件？）**，而视在功率S不能直接相加。

五、平衡三相功率

定义: $p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)$
 $= P = 3P_P = 3U_P I_P \cos \varphi = C$ (理解?)

为表示方便, 定义三相无功Q:

$$Q = 3Q_P = 3U_P I_P \sin \varphi \quad (\text{事实?})$$

定义三相视在功率S

$$S = 3S_P = 3U_P I_P$$

S、P、Q间仍组成功率三角形, 因此引入:

$$\dot{S} = 3\dot{U}_P \hat{I}_P$$

五、平衡三相功率

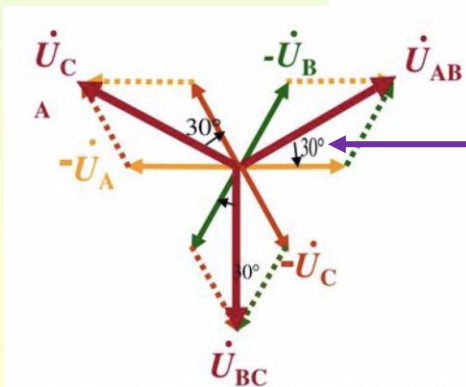
用线电压和线电流表示，
对Y和 Δ 接法，均有：

(φ 仍是每相的功率因数角)

$$\begin{cases} P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi \\ Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi \\ S = \sqrt{3}U_L I_L \end{cases}$$

用线电压和线电流表示，对Y和 Δ 接法，均有：

$$\dot{S} = \sqrt{3}\dot{U}_L \hat{I}_L e^{-j30^\circ} = \sqrt{3}U_L I_L \angle \delta_{uL} - \delta_{iL} - 30^\circ$$



$$= \sqrt{3}U_L I_L \angle \varphi$$

$$= \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi + j\sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi$$

$$= P + jQ$$

§5 电力系统负荷：电能使用和消耗

一、什么是电力系统负荷？

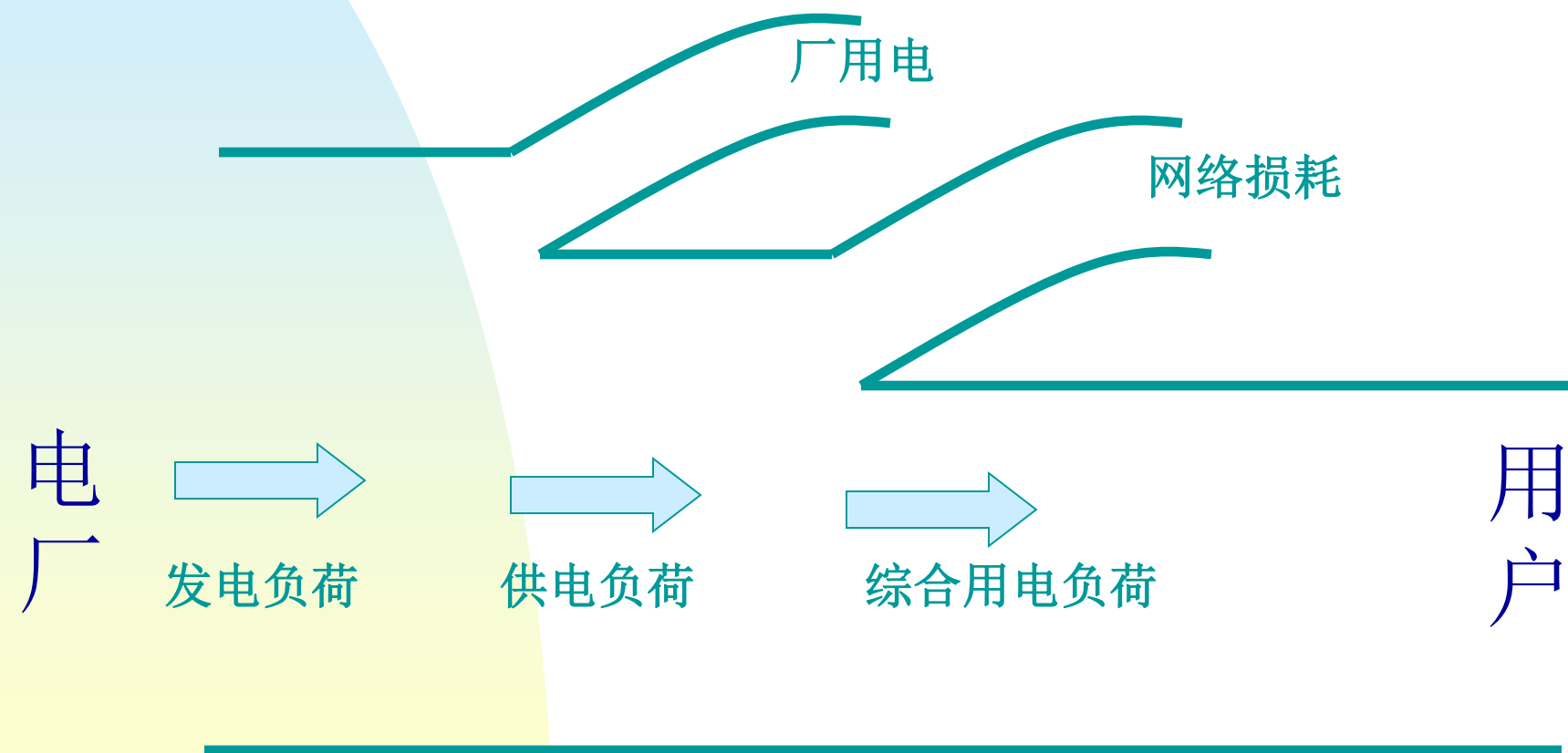
电力系统负荷是电力用户所需**电功率总和**，也称电力系统**综合用电负荷**。

可能包括工农业、交通运输和人民生活等**各方面的各种用电设备**。

主要有电动机（同步和异步）、电炉、电热、照明、整流设备等，在不同行业中比重不同，最大量的是**异步电动机**。

这里研究的电力系统负荷是指**高压输电系统负荷**，如：一个乡镇或者大工厂的总负荷，配电网网络是负荷的一部分。

二、电力系统负荷间的关系图



三、负荷损耗

厂用电：维持发电厂运行自身所需的功率。

火电厂 5~8%

水电厂 0.1~1%

核电厂 4~5%

网络损耗(网损)：电能传输、分配中消耗的功率，约为：(5~10%)负荷。

四、什么是负荷曲线？如何分类？

描述**负荷变化趋势**的数学手段：指一段时间内负荷随时间变化的曲线，可用来预测负荷趋势。

按**负荷类型**分：

有功

无功

按**时间**分：

日

(周、旬、月、年)

如何分类？

按**对象**分：

发电厂

变电所

线路

用户

五、日负荷曲线

24小时内负荷随时间的变化，随季节、地区不同而变
用途：

制定日调度计划

计算日耗电量 $A = \int_0^{24} P_d dt$ （千瓦时） （度）

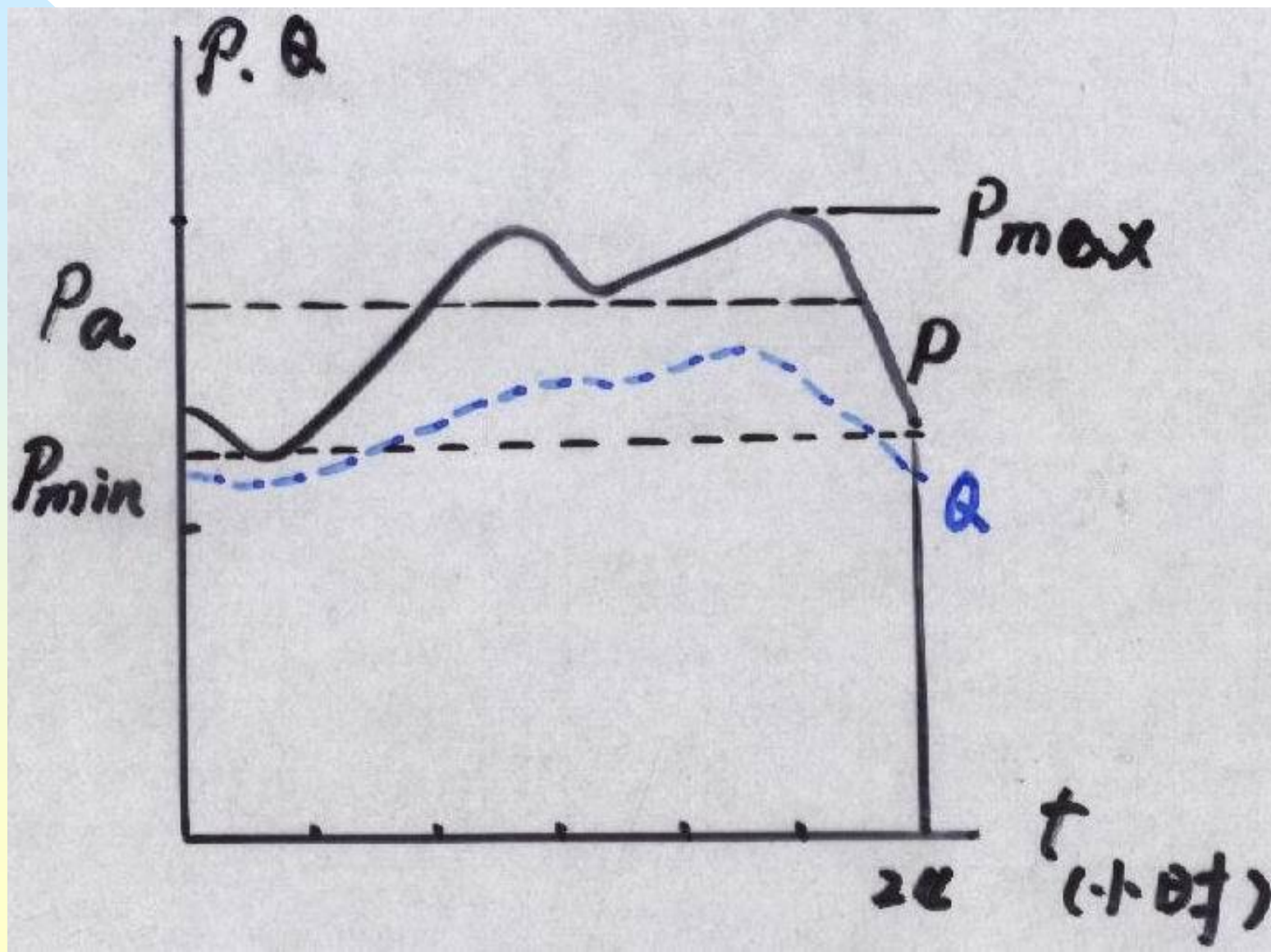
特征量：

日峰荷 P_{\max} 、日谷荷 P_{\min} 、日均荷 P_a 、峰谷差

基本负荷(谷)、中间负荷(腰)、高峰负荷(峰)

运行难易不同，随地区、季节不同而变（例）

日负荷曲线图例



六、年最大负荷曲线（自学）

反映一年内逐月（或逐日）电力系统**最大负荷**的变化

用途：

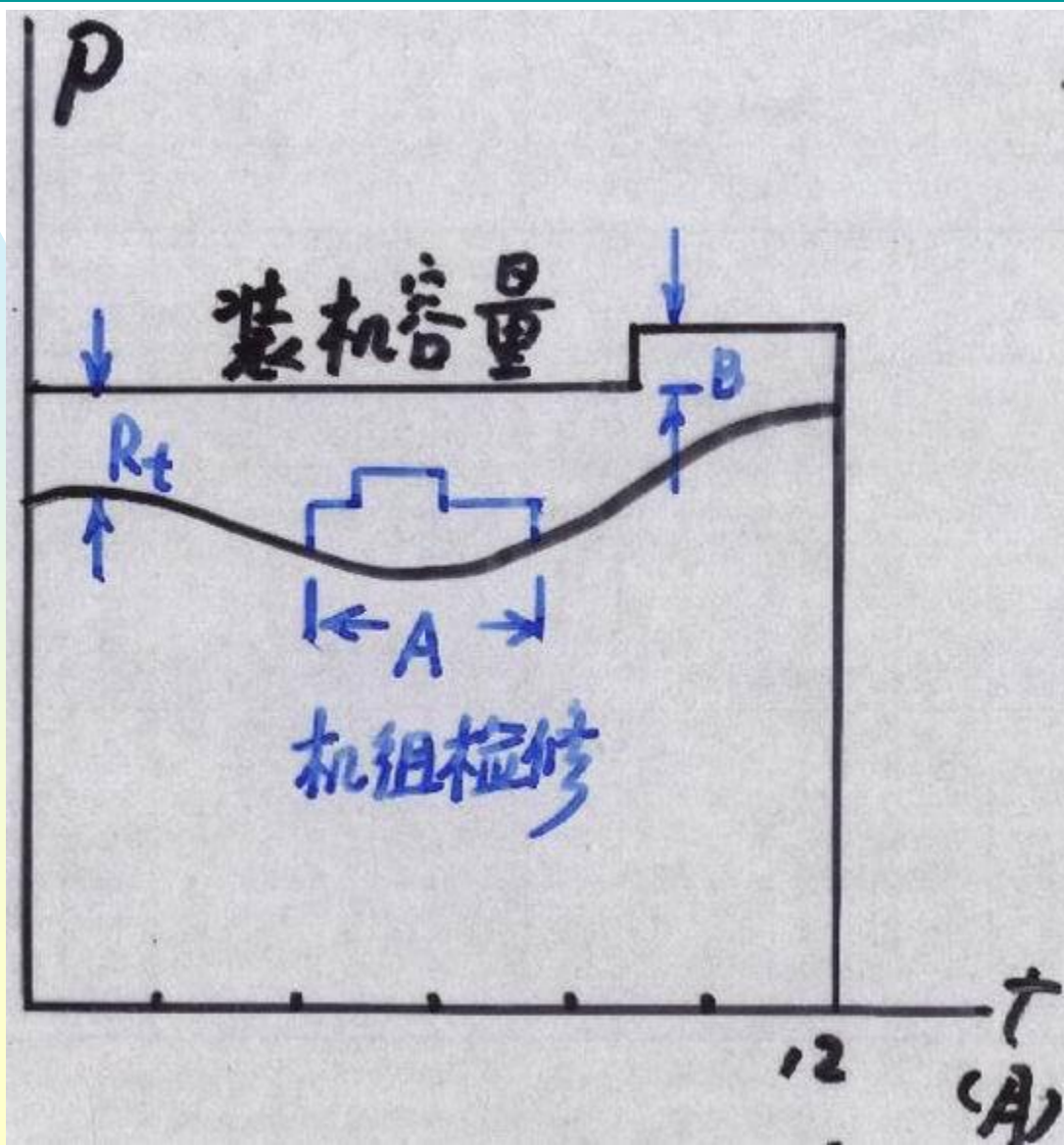
安排全年机组检修

扩建或新建发电厂

备用：负荷备用、事故备用、检修备用、国民经济备用等

不同地区曲线特点不同

年最大负荷曲线图例



七、年持续负荷曲线（自学）

电力系统全年负荷按大小及累计持续运行时间（小时数）的顺序排列而作的曲线

用途：编制发电计划、计算可靠性、系统规划

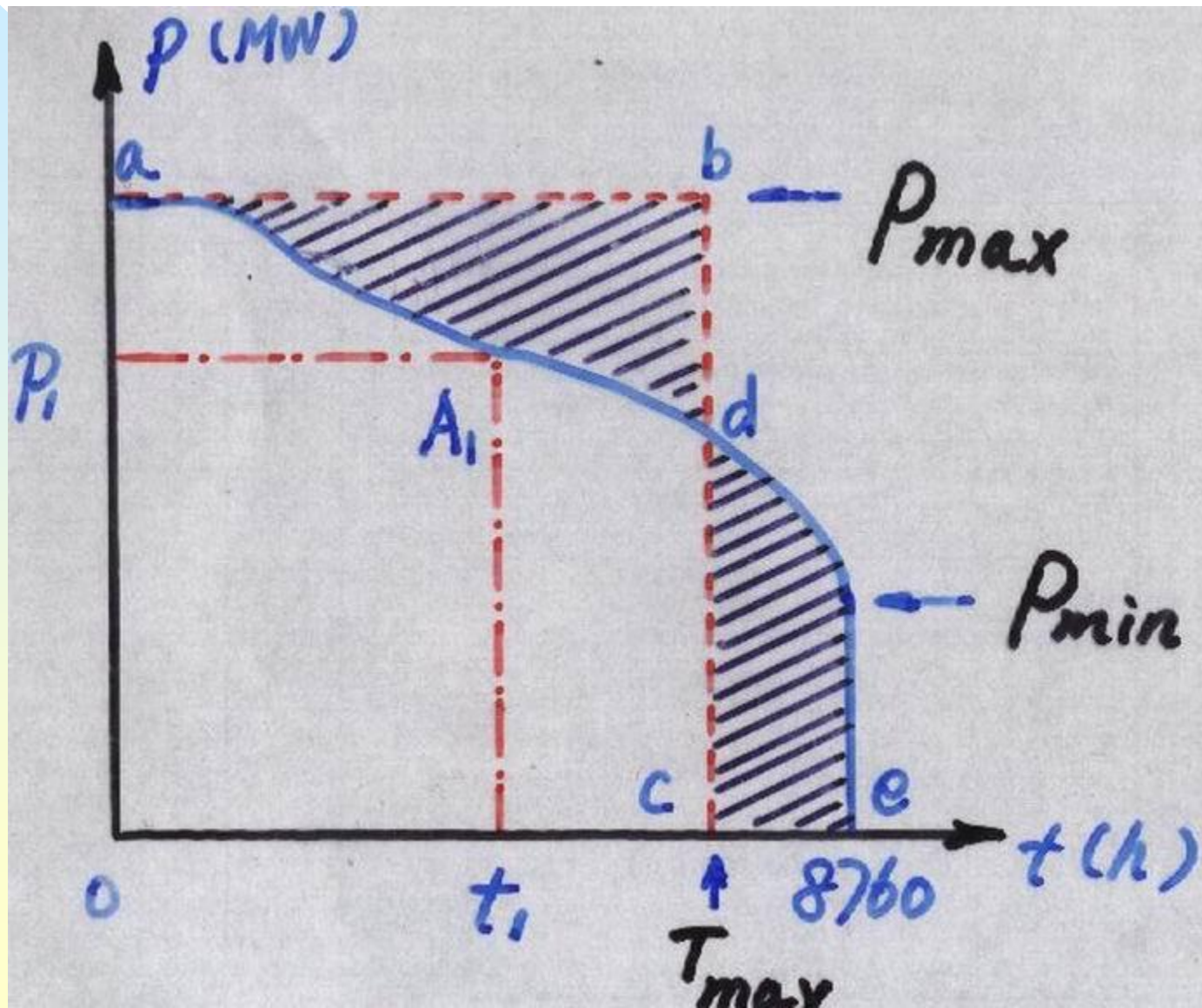
算出全年所耗电能： $\sum A = \int_0^{8760} P_y dt$

年最大负荷利用小时数：全年所耗电能，若按最大功率使用所能持续的时间（小时）

$$T_{\max} = \frac{\sum A}{P_{\max}} = \frac{\int_0^{8760} P_y dt}{P_{\max}}$$

我国 T_{\max} 约5000小时，发达国家要小一些。

年持续负荷曲线图例



八、什么是负荷预测？

负荷预测：利用已知的历史负荷、气象信息等，结合人工经验，预测未来的负荷变化。

重要性：可类比产品市场预测，况且电能不同大量存储，对预测精度要求高。

难度（类比天气或股市预测）：有工农业生产状况、地理位置、气候气象条件、节假日、作息制度及人民生活习惯等诸多因素的影响。

尚未完全解决。

自学 与 思考

直流输电与交流输电相比，有何优缺点？

你能快速辨认出直流输电线路么？

八卦一下爱迪生和特斯拉的交直流战争史。

为什么要预测负荷？

负荷为什么可以预测？

典型的负荷曲线长什么样子？

什么样的负荷曲线对电网更“友好”？

负荷曲线能够被“改变”么？

第二章 电力系统稳态模型

(Power System Steady State Models)

第一讲 电力线路模型

问 题

- 1、电力系统稳态分析如何建模？
- 2、物理线路的基本结构如何？
- 3、输电线的电磁现象？用什么参数表示？
- 4、各个参数受哪些因素影响？
- 5、如何用等值电路表示输电线路？

第二章 电力系统稳态模型

(Power System Steady State Models)

第一讲 电力线路模型

§1 稳态建模总体思路

观察和分析电气元件稳态的物理现象



元件建模：等值电路（**线/变/荷/发**）



系统建模：全网等值电路、网络方程

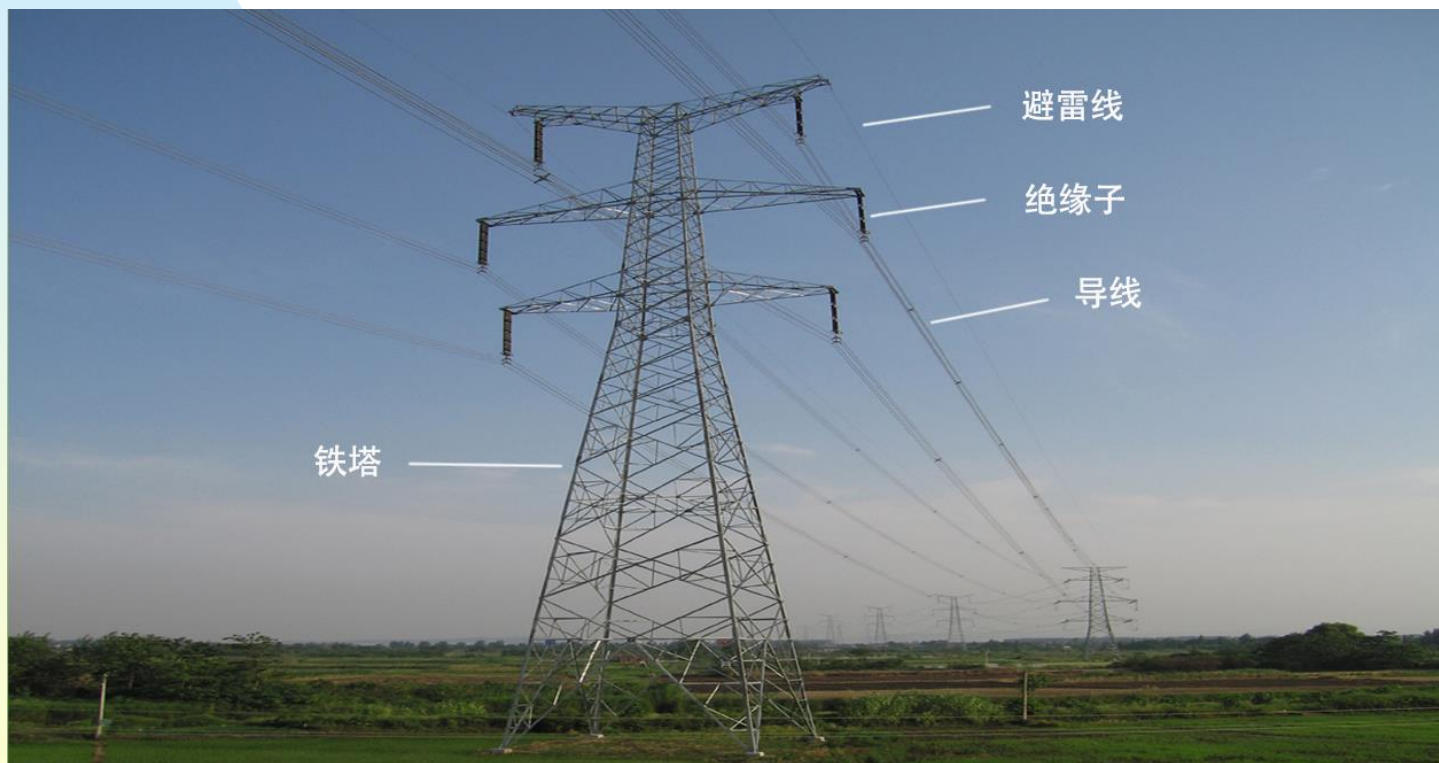


各种解法

§2 电力线路结构和电磁现象

一、架空线

组成和作用？



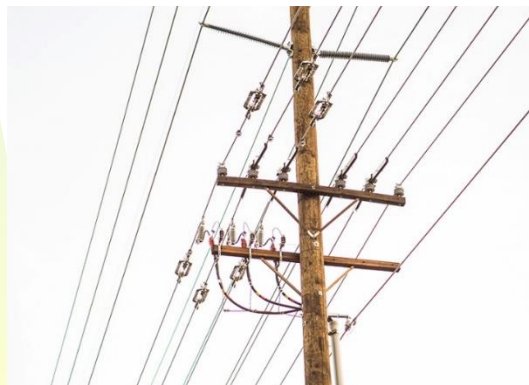
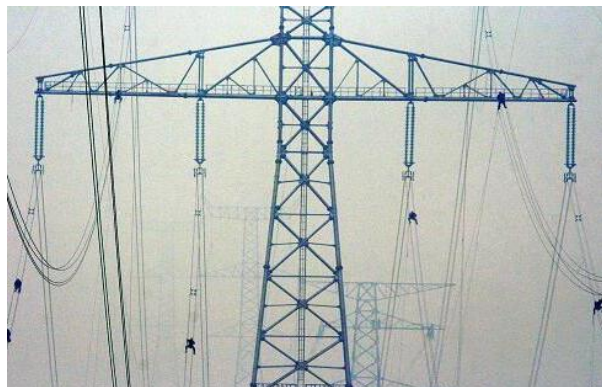
档距
弧垂

750kV同塔双回线路

§2 电力线路结构和电磁现象

一、架空线

各种电压等级的架空线



导线构造和型号

导线构造3种主要形式：

单股线（单根实心金属线：铜和铝）（很少采用）

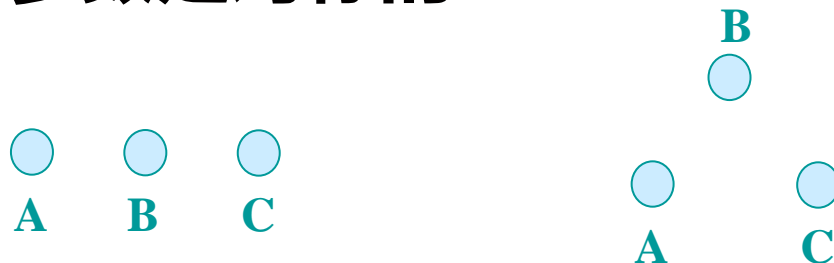
多股绞线（同材料），多单股线扭绞，标号：TJ（铜绞）、LJ（铝绞）、GJ（钢绞）

多股绞线（两种材料）：主要是**钢芯铝绞线**，“**好导电性能 + 高机械强度**”，普遍采用。标号：LGJ（普通型）、LGJQ（**轻**型）、LGJJ（**加**强型）

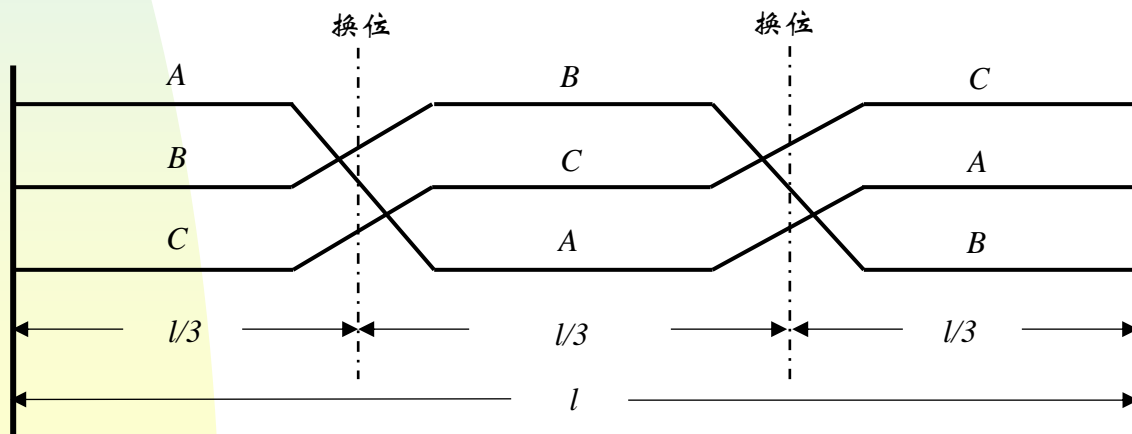
型号：标号+数字（导线主要载流额定截面积 mm^2 ）
例LGJ-150:钢芯铝绞线额定截面积 150mm^2

架空线中的特殊问题

哪种排列参数是对称的？



排列不对称（参数不平衡）：**三相循环换位**



架空线中的特殊问题

排列不对称（参数不平衡）：**三相循环换位**



**500kV
双回
耐张
转角
换位塔**



架空线中的特殊问题

减少线路电抗和电晕损耗：**分裂导线**

500KV



750KV



1000KV

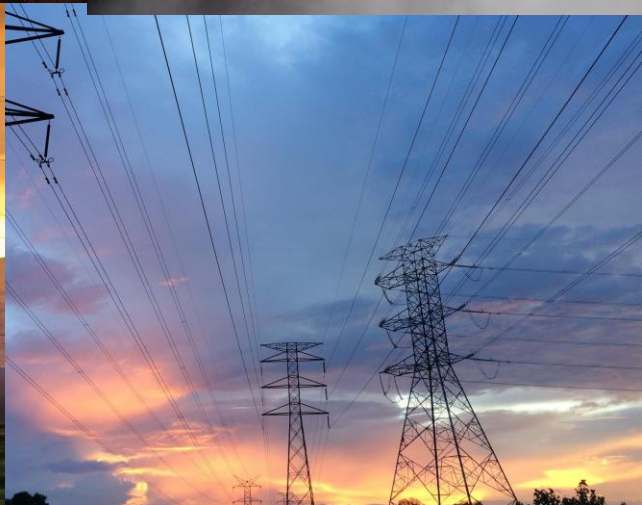


380米高空上的电力医生

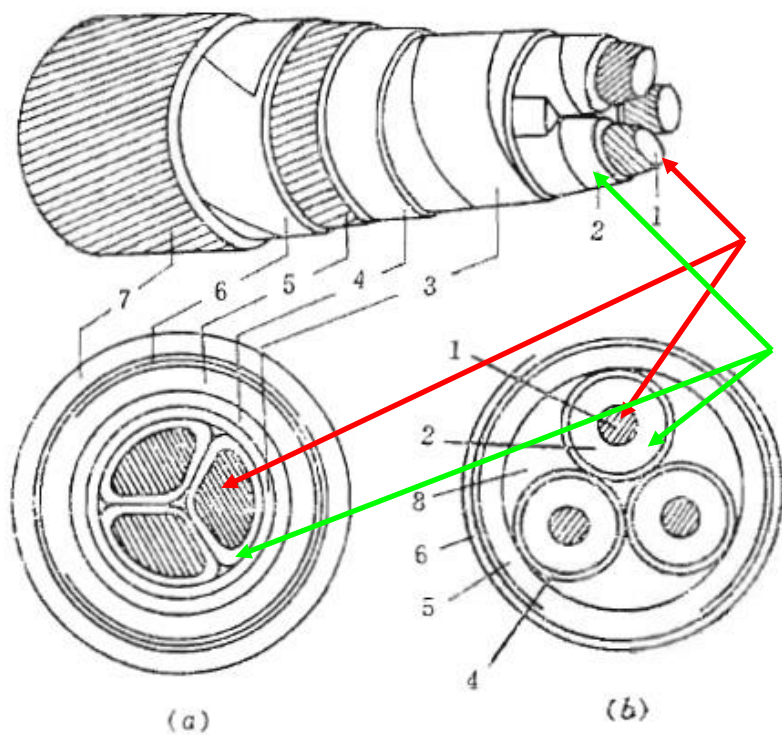
电网头条 



一种工程的美



二、电缆



二、电缆





**这么复杂的电力线路
应该如何入手建模？**

四、线路的电磁现象和参数

线路加**交流电流**:

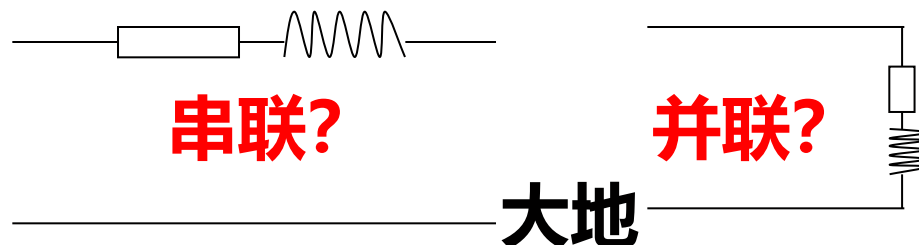
发热, 消耗有功功率

→ **R**

交流电流 → 交变磁场 → 感应电势(自感、互感)
抵抗电流

→ **X**

电流效应:



线路的电磁现象和参数

线路加**交流电压**:

绝缘漏电, 一定电压下发光、放电 (电晕)

→ **R' (G)**

电场 → 线/线、线/大地电容 → 交变电压产生电容电流

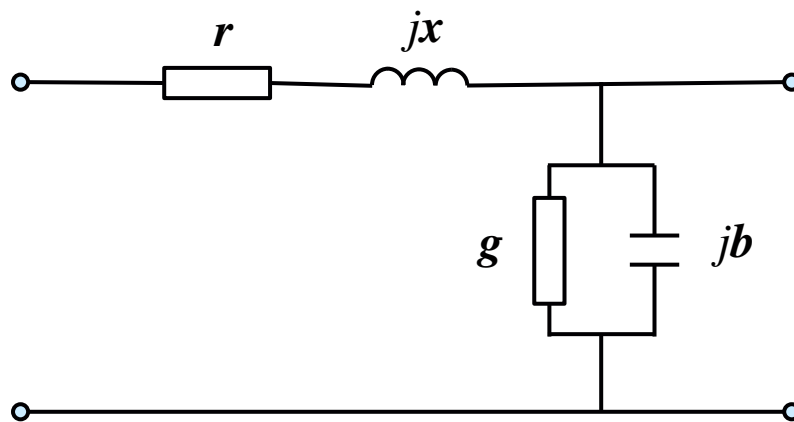
→ **X' (B)**

电压效应:



五、单位长线路等值电路和参数

分布式参数：用单位长 (/km) 参数 r 、 x 、 g 、 b 表示



电缆尺寸标准化，外界影响小，一般不变（不研究）

架空线受气候、地理、架设的影响， r 、 x 、 g 、 b 要变

§3 架空线的参数计算

§3.1 电阻r计算

$$r = \rho / nS \quad (\text{欧/公里})$$

ρ : **计算用电阻率**, 欧·毫米²/公里, 铜18.8, 铝31.5(20°C), 温度修正

S : **额定导电截面积**、毫米²

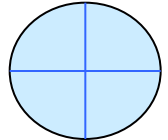
n : 每相导线的根数 (**分裂数**)

ρ 略大于直流电阻率, 原因: 集肤效应、绞线、 $S >$ 实际截面

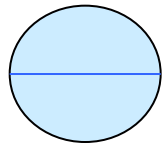
§3.2 电抗 x 计算

一、公式推导思路（电磁学，自学）

1、分析长直圆导线周围的**磁场分布**：



据安培环路定律： $I \rightarrow H$ （磁场强度）



2、分析导线所交的**磁链**：

磁感应强度： $B = \mu(\text{导磁率}) \cdot H$

磁通： $\Phi = A \cdot B$

磁链： $\psi = W \cdot \Phi$

自磁链 + 互磁链（助磁还是去磁？）

内磁链 + 外磁链（内磁链是分数匝）

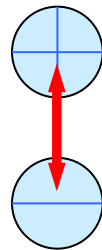
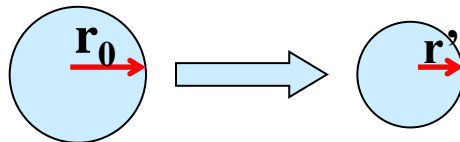
3、得到电感 L 和**电抗 x** ： $L = \psi / I$, $X = \omega \cdot L$

二、结论：单相输电线电感 (两根平行长直圆导线组成回路)

$$L_1 = L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r'} \quad (\text{亨/米})$$

D_{12} : 两导线中心距离, 米。

$r' = e^{-\frac{1}{4}} r_0 = 0.779 r_0$ (分数匝), 计及内磁链等值半径



另一导线电流对其的互感起去磁作用 (体现在哪?)

如何理解参量 (如果要改变 L , 怎么办?)

三、结论：三相输电线电感

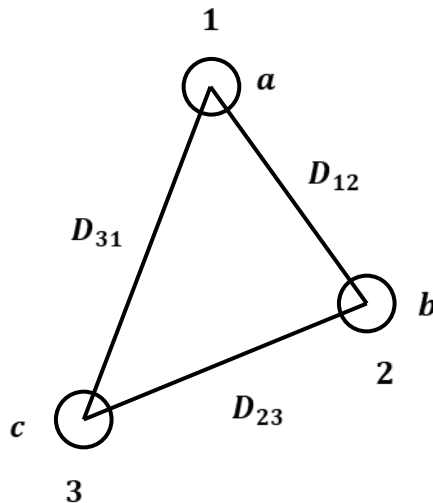
对称排列： $L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{r'} \text{亨/米}$

D_{eq} ：导线间距离，米

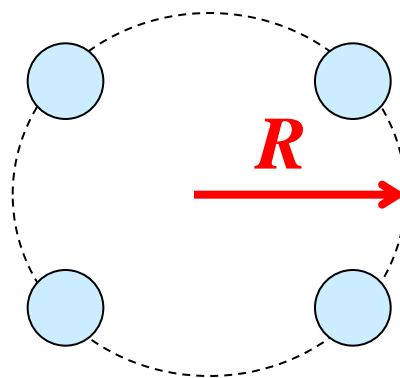
不对称排列（经换位）： 公式同上

$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$ ：导线间几何均距

D_{12}, D_{23}, D_{31} ：三相导线两两间距离



三相输电线电感：导线分裂情形



n = 4: 分裂数

导线分裂且换位：

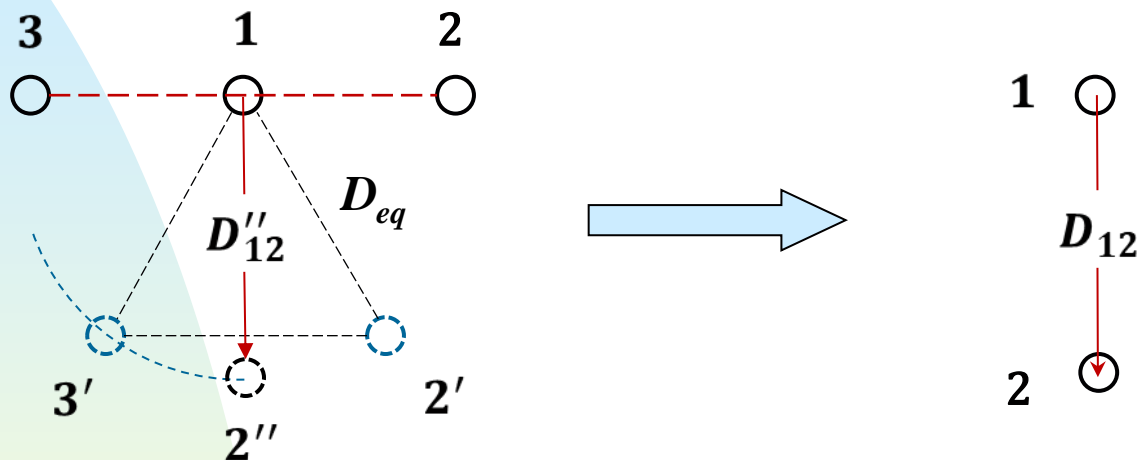
$$L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D'_s} \text{亨/米}$$

$$D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'} \text{米, 几何平均等值半径}$$

R: 分裂导线中心所在圆周的半径

n = 1: 结论统一性

结论的统一性 (由单相到三相的推导)



$$L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D'_s} \quad \longleftarrow \quad L_1 = L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r'}$$

四、最终结论：导线电抗（怎么记？）

$$x = \omega L_A \times 1000 \text{ 欧/公里}$$

$$x = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D'_s} \text{ 欧/公里 (三相分裂换位)}$$

$$r' = 0.799 r_0$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$$

$$D'_s = \sqrt[n]{n R^{n-1} r'}$$

- 不分裂？
- 三相对称？
- 单相？
- 理解参量？
- 降低x的技术措施？

计算注意点

$D_{eq} \cdot D'_s \cdot r'$ 单位一致

$r' = 0.779r_0$ 适用于单股线；多股绞线 $< 0.779r_0$ ；
钢芯绞线 $r' > 0.779r_0$ (实际算题)

经验数据： 不分裂110/220KV, $x = 0.4\Omega/\text{km}$

L客观存在，取决于 D_{eq} , $D'_s(r')$ ，是等值电感，**与i大小无关**，但与三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 间的关系有关，须满足 $i_a + i_b + i_c = 0$ ，如不满足，则L要变化。

§3.3 电导g计算（自学）

主要由**电晕**引起，**实测**

计算： $g = \frac{\Delta P_g}{U^2} \times 10^{-3}$ 西门/公里

U : kV(线电压)

ΔP_g : 电晕损耗有功功率kW/km(三相)

U_{cr} : **临界电压**、能发生电晕的最低电压，因素：
材料表面光滑程度，天气，空气密度，材料半径，
三相排列位置，分裂情况有关。

设计时考虑晴天不发生电晕，一般情况 **g忽略**

§3.4 电纳b计算

一、公式推导思路（电磁学，自学）

研究b，需研究电容C，须先找**电位差 u_{12}** 与**电荷q**的关系，即先要分析导线周围**电场分布**

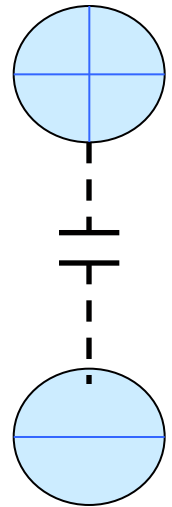
由**高斯定理**： $q \rightarrow D$ (电力线密度)

电场强度： $E = D/\epsilon$ (介电常数)

由 $E \rightarrow U_{12}$

$C = q/U_{12}$

$B = \omega * C$



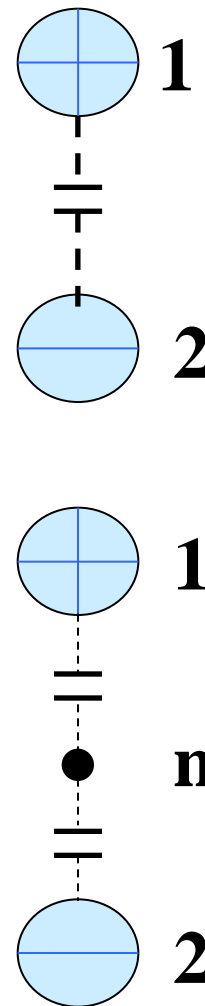
二、结论：单相输电线电容 (两根平行长直圆导线组成回路)

线/线： $C_{12} = \frac{0.012}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6} \text{法/公里}$

线/地 (中性点、零电位点)

$$C_{1n} = C_{2n} = 2C_{12} = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6}$$

注意： r_0 区别于电抗中 r' ，原因？
如何理解参量？（如何改变C？）



三、结论：三相输电线电容（线/地）

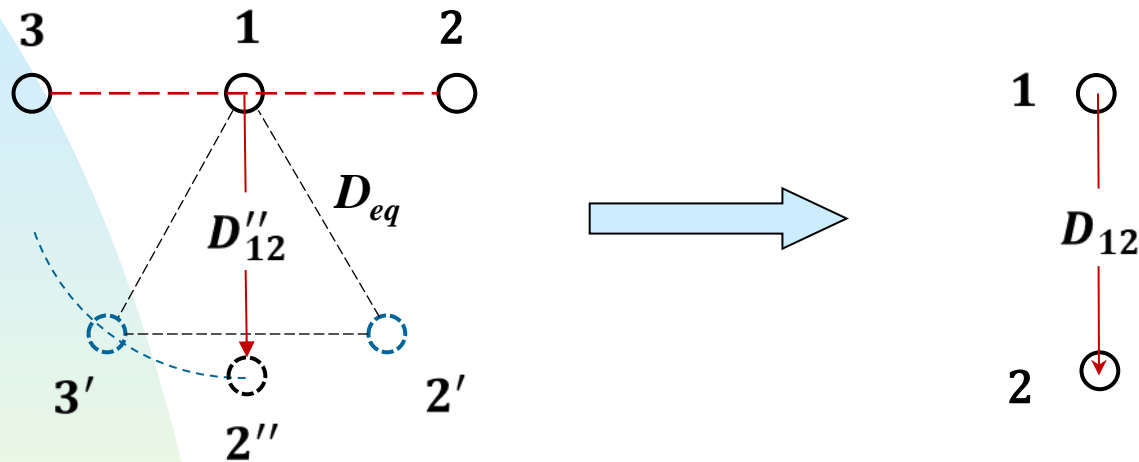
对称排列： $C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r_0}} \times 10^{-6} \text{法/公里}$

分裂导线（换位）： $C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_S}} \times 10^{-6}$

$D_S = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$ ：几何平均半径

n = 1：结论统一性

结论的统一性 (由单相到三相的推导)



$$C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6} \quad \longleftrightarrow \quad C_{1n} = C_{2n} = 2C_{12} = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6}$$

四、最终结论：导线电纳（怎么记？）

$$b = \omega C = 314 \times \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_S}} \times 10^{-6}$$

$$b = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{D_S}} \times 10^{-6} \text{ 西门/公里 (三相分裂换位)}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad D_S = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$$

- 不分裂？
- 对称排？
- 单相（线/地）？
- 理解参量？

计算注意点

D_{eq} 、 D_S 、 r_0 **单位一致**，区别电抗中 D'_S r'

经验数据：不分裂 $b = 2.6 \sim 2.85 \times 10^{-6}$ 西门/公里

C客观存在，取决于 D_{eq} 、 $D_S(r_0)$ ，是等值电容，**与u大小无关**，但与三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 间关系有关，须满足 $u_a + u_b + u_c = 0$ ($q_a + q_b + q_c = 0$)，如不满足，则C要变化。

§4 电力线路的等值电路

§4.1 架空线分布参数汇总

$$r = \rho / ns \quad \text{欧/公里}$$

$$x = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D'_s} \quad \text{欧/公里}$$

$$g = 0$$

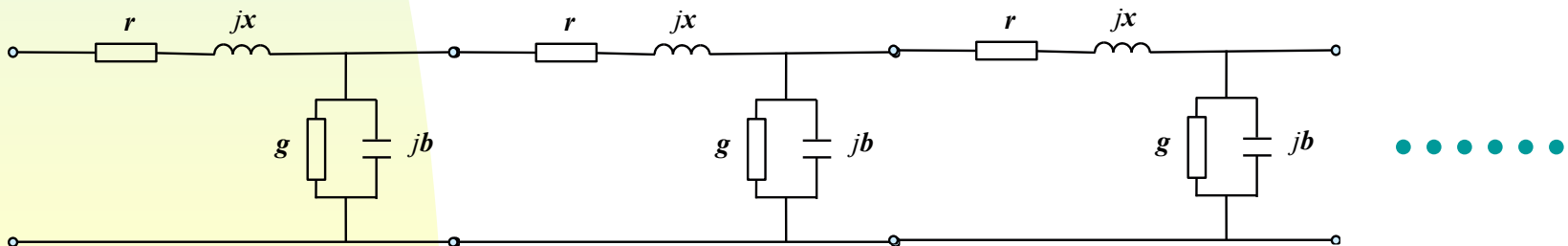
$$b = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6} \quad \text{西门/公里}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$$

$$r' = 0.779r_0$$

$$D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'}$$

$$D_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$$



实用中不方便，怎么办？

§4.2 集中参数等值电路

一、推导思路

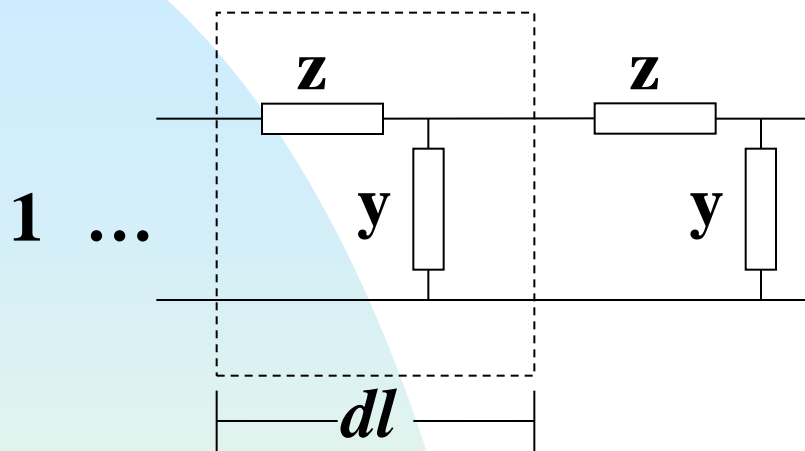


关心线路1、2两端电量关系（而非沿线分布）：
分布式参数→全长集中参数

推导思路：

- 1、建立分布参数电路：1、2端构成二端口网路**
- 2、建立分布参数表示的网络方程：微分方程**
- 3、解出两端口电压和电流关系→用集中参数表示的二端口等值网路（电路原理）**

推导思路（I）：导出二端口网络方程



$$\dots 2 \rightarrow \begin{cases} d\dot{U} = \dot{I}zdl \\ d\dot{I} = \dot{U}ydl \end{cases}$$

给定边界条件，解出线路任意点电压和电流

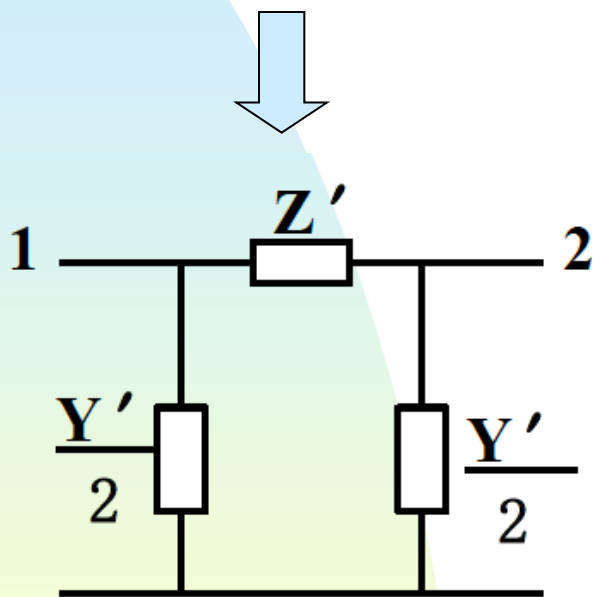
给定 $\dot{U}_2 \ \dot{I}_2 \rightarrow \dot{U}_1 \ \dot{I}_1$ （即：二端口网络方程）

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{ZY} & \sqrt{Z/Y} \sinh \sqrt{ZY} \\ \sqrt{Y/Z} \sinh \sqrt{ZY} & \cosh \sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

$Z=zL$ 相总串联阻抗， $Y=yL$ 相总并联导纳， L 线路长度

推导思路（II）：导出 π 型等值电路

二端口网路方程



$$\left\{ \begin{array}{l} Z' = Z \cdot \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \\ \frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \cdot \frac{\tanh \frac{\sqrt{ZY}}{2}}{\frac{\sqrt{ZY}}{2}} \end{array} \right.$$

修正系数

$L > 750\text{km}$ 长线：用该公式精确计算

推导思路 (Ⅲ) : 近似计算

750 ≥ L ≥ 300km: 取级数前2项

$$\begin{cases} Z' = Z(1 + \frac{ZY}{6}) \\ \frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2}(1 - \frac{ZY}{12}) \end{cases}$$

L ≤ 300km: 取级数前1项
(不考虑分布参数影响, **常用**, 如何理解?)

$$\begin{cases} Z' = Z \\ \frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \end{cases}$$

L ≤ 100km, 电压等级 ≤ 35kv:
忽略并联导纳

$$\begin{cases} Z' = Z \\ \frac{Y'}{2} = 0 \end{cases}$$

作业：

详见网络学堂

最晚下周五（9月27日）提交电子版

在380米高空巡线是什么体验？

https://www.bilibili.com/video/av802066044/?vd_source=a964b05230c39fca7023aac827a263fe

生产价值百万美元的水下电缆的过程（截至3分5秒）

https://www.bilibili.com/video/BV1GT421k7uM/?share_source=copy_web&vd_source=023768b17d8123bfa26fcc8db56d801f

专题研讨-2（可选）

选择一个角度，阐述什么是“好”的负荷

要求：

- 1-3分钟视频
- 软件拍摄，或PPT+配音后生成视频
- 通过网络学堂上传