西安交通大學
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 9

主 讲：刘 俊

电力工程系

电气工程学院
xjtu school of electrical engineering

第四章 新能源电力系统稳态运行分析与计算

4.1 传统电力系统的潮流计算

4.2 风力发电和光伏发电并网的潮流计算

熟练掌握风力发电接入系统的潮流计算模型。

熟练掌握光伏发电接入系统的潮流计算模型。

4.3 含新能源电力系统的随机潮流计算

了解风力发电接入系统的随机潮流模型。

了解光伏发电接入系统的随机潮流模型。

4.4 新能源并网后电力系统的频率控制

重点掌握新能源接入后一次、二次调频方法。

4.5 新能源并网后电力系统电压及无功补偿控制

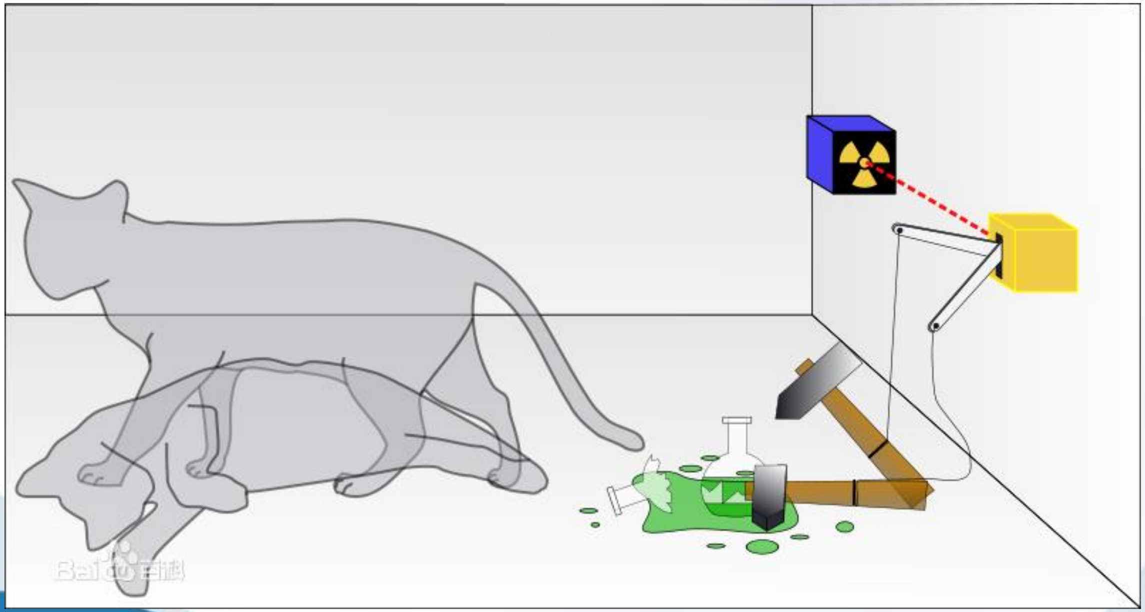
掌握新能源对系统节点电压水平的影响及无功补偿控制。

什么是随机性?

- **随机性**（Randomness）是偶然性的一种形式，具有某一概率的事件集合中的各个事件所表现出来的<u>不确定性</u>。

自然界是确定性与随机性的统一!

生活中还有哪些不确定性



一、电力系统随机潮流计算

- 1.随机潮流计算的背景
  - 随机潮流（Stochastic Load Flow），或称概率潮流（Probabilistic Load Flow）是一类考虑随机变量的特殊潮流问题，1974年由波兰华沙电力研究所B. Borkowska提出。
  - 传统的潮流计算，所有给定量都是确定性的量，因此潮流计算结果也是确定的。而严格说来，有些量不仅随时间而变化，而且具有不确定性。

- 随机潮流的意义
  - 通过求解随机潮流，可以知道在各种因素随机波动的条件下，当前运行方式各个节点电压的越限概率。可以指导电力系统运行人员找出电压薄弱区域或者节点，有针对性的进行无功补偿控制。
  - 通过求解随机潮流，可以知道各条支路的潮流有多大可能性超出它所允许的极限值，也可以知道线路上的潮流值最大可能是多少。在规划设计中，如果知道电网过负荷的可能性很小，就不必花费较大的代价去新建线路或扩容变压器。因此，随机潮流计算是很有实用价值的。

电力系统中的不确定性

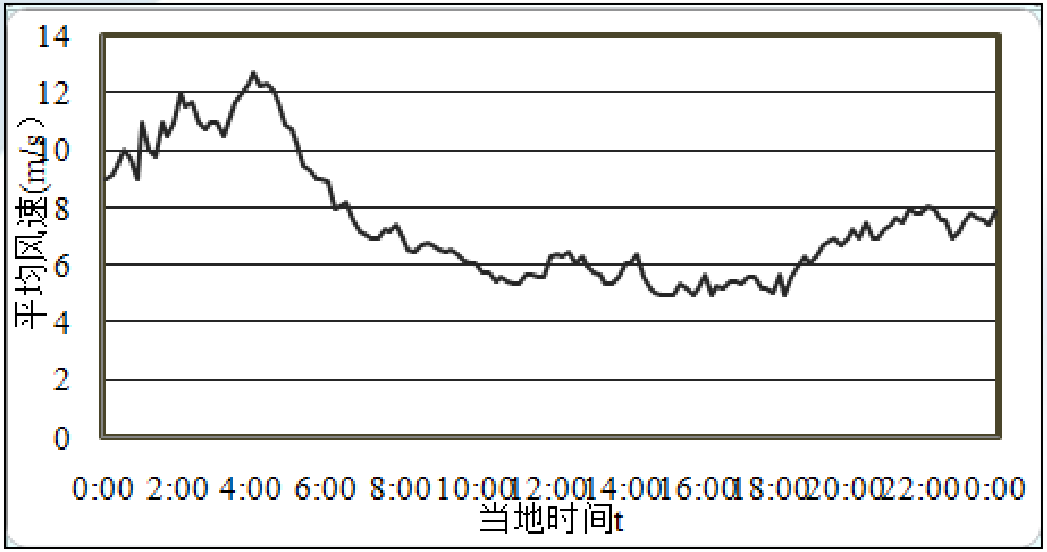
（1）在实时运行环境中，描述当前系统运行状态的量都是通过仪表量测得到的，有量测误差存在；

（2）在规划设计阶段，要对几年、十几年以后的电源和电网的发展进行规划设计，长时间段以后的系统负荷预测不可能准确；

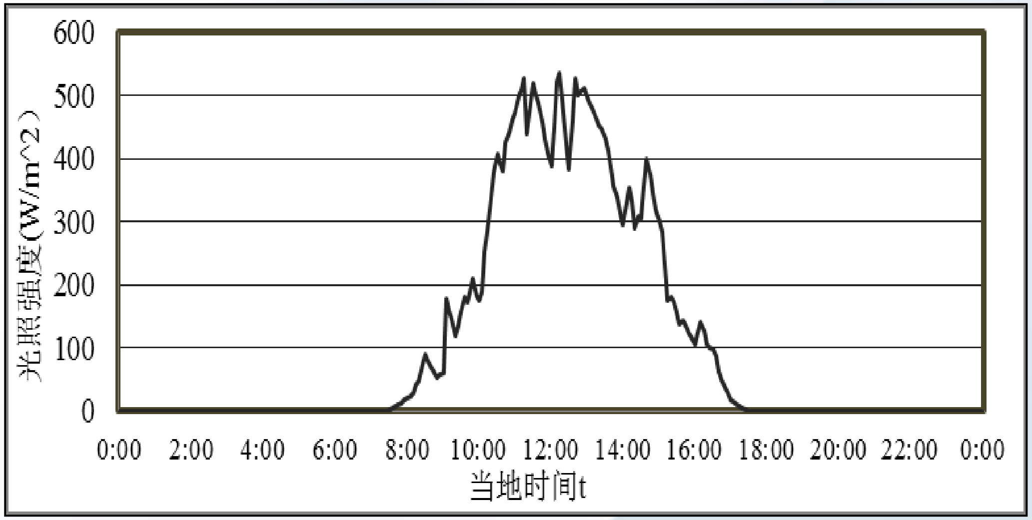
（3）发电机的可靠性也并非百分之百，也存在出现故障退出运行的可能性，有时也需要把发电机功率作为一个随机变量处理；

（4）新能源风力发电、光伏发电等电源的出力随气象参数变化，而具有随机性。

电力系统中新能源出力的不确定性



冬季典型日风速数据



冬季典型日光照数据

2.随机潮流计算的计算方法

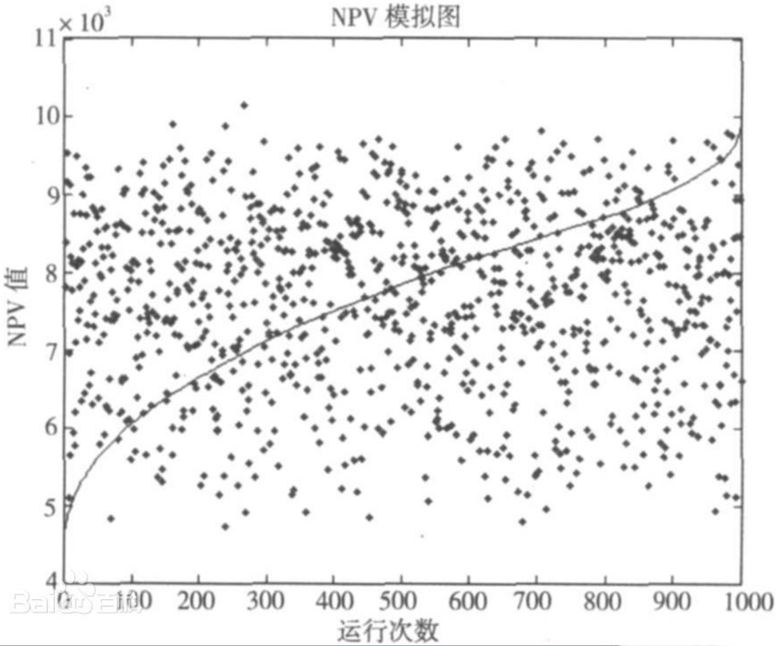
- 1）蒙特卡罗模拟法**——可作为解析法的比对结果**

当所求解问题是某种随机事件出现的概率，或者是某个随机变量的期望值时，通过某种“实验”的方法，以这种事件出现的频率估计这一随机事件的概率，或者得到这个随机变量的某些数字特征，并将其作为问题的解。蒙特卡罗方法的解题过程可以归结为三个主要步骤：构造或描述概率过程；实现从已知概率分布抽样；建立各种估计量。

  - 样本容量需求大；
  - 计算耗时长。

蒙特卡罗法

- 蒙特卡罗法也称统计模拟法、统计试验法。是把概率现象作为研究对象的数值模拟方法。是按抽样调查法求取统计值来推定未知特性量的计算方法。
- 蒙特卡罗是摩纳哥的著名赌城，该法为表明其随机抽样的本质而命名。故适用于对离散系统进行计算仿真试验。
- 在计算仿真中，通过构造一个和系统性能相近似的概率模型，并在数字计算机上进行随机试验，可以模拟系统的随机特性。



2.随机潮流计算的计算方法

2）**解析法随机潮流**——传统随机生产模拟的随机潮流计算

- 考虑两个随机变量的和的运算，不像确定性变量的求和这样简单，需要通过卷积来实现。
- **如：在发电机逐个卷积的过程中，等效负荷持续曲线在不断变化，最大等效负荷也在不断增加。**

- 假设系统原始**负荷持续曲线（LDC）**为$f_0(x)$，x代表负荷，纵坐标为能满足x总量负荷的概率$f(x)$，1#发电机组的额定容量为C_1，强迫停运率为q_1，正常运行的概率为p_1，其中q_1=1- p_1，根据Baleriaux–Booth卷积公式，考虑1#发电机组随机停运影响后，系统的**等效负荷持续曲线（ELDC）**为：

$$f_1(x) = p_1 f_0(x) + q_1 f_0(x - C_1)$$

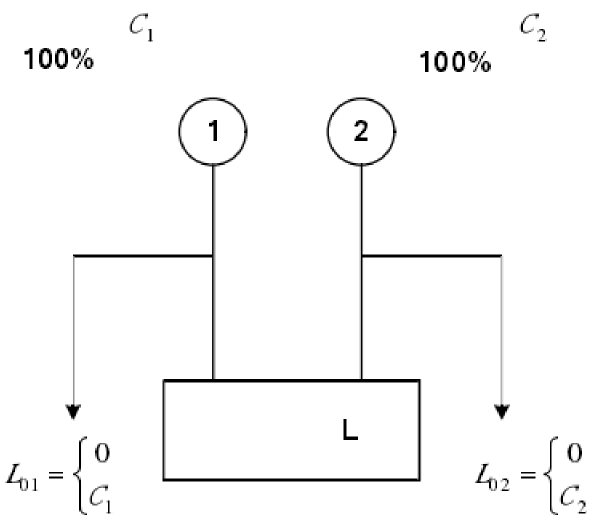


图 4.1 虚拟发电机组及虚拟的系统负荷模型

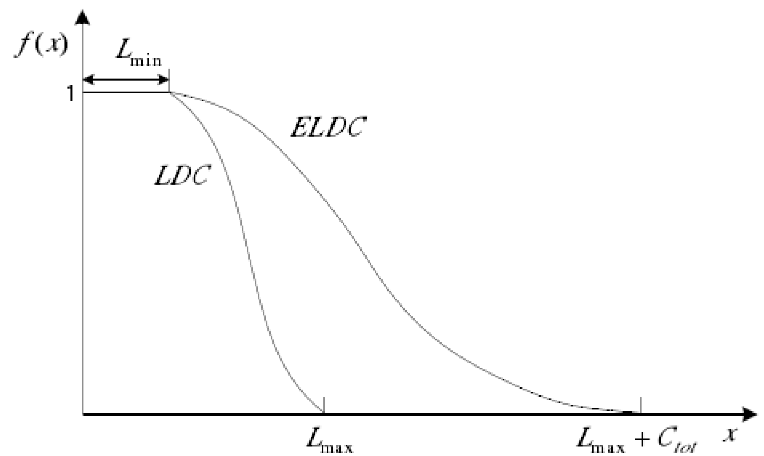


图 4.2 负荷持续曲线和等效负荷持续曲线

$$f_i(x) = p_i f_{i-1}(x) + q_i f_{i-1}(x - C_i)$$

2.随机潮流计算的计算方法

- 2）解析法随机潮流——**基于半不变量的随机潮流计算**

  通过已知随机变量的信息，一次性计算得到某些待求随机变量的数字特征。解析法随机潮流计算基于概率学基础理论，可模拟、量化光伏发电和风力发电出力的随机性、负荷的随机停运及发电机的随机停运等电力系统随机因素，快速给出系统状态变量的分布。

  – 假设随机变量间相互独立；
  – 假设拓扑结构不发生变化；
  – 采用在稳态运行点线性化的潮流方程；
  – 避免耗时较长的卷积运算。

3.补充概率论基本概念

- 随机变量及其数字特征(连续型、离散型):

  （1）随机变量的分布函数

  （2）随机变量的概率密度函数

  （3）数学期望

  （4）方差和标准差

  （5）矩和中心矩

（1）随机变量的分布函数

- 设某概率事件E的发生情况集合为X，若对于$x \in X$ 的所有点，有唯一的实数$Y=Y(X)$与之对应，则$Y(X)$称为样本空间X上的**随机变量**。
  - 由随机变量的定义可知，对于每一个实数x，$\{X \leq x\}$都是一个事件，因此有一个确定的概率$P\{X \leq x\}$与x相对应，所以 $P\{X \leq x\}$是x的函数，称$F(x)$为**随机变量X的分布函数**：

$$F(x) = P\{X \le x\}, -\infty < x < +\infty$$

（2）随机变量的概率密度函数

- 对于离散型随机变量X，其所有可能取值为$\{x_1, x_2, \ldots\ldots\}$，则随机变量$X$的概率密度：

$$p_i = P\{X = x_i\}, (i = 1, 2, \cdots)$$

- 而对连续型随机变量X，如果对于其分布函数为$F(x)$存在$f(x)$能够使任意实数x，有：

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dt, f(x) \geq 0$$

则称$f(x)$为随机变量X 的概率密度函数。

（3）数学期望

- 若离散型随机变量X的分布律为：

$$P\{X=x_k\}=p_k, k=1,2,\cdots$$

且级数 $\sum_{i=1}^{n} x_i p_i$ 是绝对收敛的，则称之为X的数学期望，记作$E(X)$，即：

$$E(X)=\sum_{i=1}^{n} x_i p_i$$

（3）数学期望

- 若连续型随机变量X具有概率密度函数$f(x)$，则称$\int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$为随机变量$X$的数学期望：

$$E(X)=\int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

- 数学期望在实际工程应用中也常被称作均值。

（4）方差和标准差

- 数学期望体现随机变量取值的平均水平，而方差用来描述随机变量取值分散程度。
- 对于离散型随机变量：

$$D(X)=\sum_{i=1}^{+\infty}[X_i-E(X)]^2 p_i,\sigma(X)=\sqrt{D(X)}$$

- 对于连续型随机变量：

$$D(X)=E\{[X-E(X)]^2\},\sigma(X)=\sqrt{D(X)}$$

（5）矩（Moment）和中心矩

- 对离散型随机变量X，设取值x_i的概率为p_i，则v阶矩m_v（v为非负整数）可由下式求得：

$$m_v = \sum_i^n p_i x_i^v$$

- 当$v=1$时，由下式可得到X的一阶矩，也就是期望值μ:

$$\mu = m_1 = \sum_i^n p_i x_i$$

- 定义x的各阶中心矩M_v为下式：

$$M_v = \sum_i^n p_i (x_i - \mu)^v$$

（5）矩和中心矩

- 若X为连续型随机变量，设其概率密度函数为$f(x)$，分布函数为$F(x)$，则其v阶矩m_v的定义为

$$m_v = \int_{-\infty}^{+\infty} x^v f(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x^v dF(x)$$

- 当v=1时，可得到X的一阶矩，也就是期望值μ:

$$\mu = m_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

- 定义x的各阶中心矩M_v为下式：

$$M_v = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\mu)^v f(x)dx$$

（5）矩和中心矩

- 在统计学中，较常用的矩是一阶原点矩和二阶中心距:
  - 一阶原点矩即为概率密度函数的期望值
  - 二阶中心距即为概率密度函数的方差

几种常用的随机变量分布

- （1）正态分布
  - X服从均值为μ，标准差为σ的正态分布，记为

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \qquad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}), -\infty < x < +\infty$$

  - 当μ＝0，σ＝1时称X服从标准正态分布，其概率密度函数和分布函数分别为：

$$\begin{cases} \varphi(x) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\dfrac{x^2}{2}) \\ \phi(x) = \displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty} \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\dfrac{x^2}{2}) dx \end{cases}$$

几种常用的随机变量分布

- （1）正态分布
  - 正态分布有两个非常重要的性质：
    - **性质1**：若 $X \sim N(\mu,\sigma^2)$ ，则 $\dfrac{X-\mu}{\sigma} \sim N(0,1)$。
      - 这个性质说明正态变量可以通过线性变换转化为标准分布的正态变量，多个独立的正态变量经过线性组合后仍是正态变量。
    - **性质2**：正态变量的均值和方差分别为 μ和σ^2。

几种常用的随机变量分布

- （2）二项分布
  - 假设做n次试验，每次都以概率p出现事件A或者以1-p的概率出现事件$\bar{A}$。以随机变量$x=k$来表示这n次结果独立的试验中事件A恰好出现k次，则这个事件的概率函数为：

$$P(x=k)=C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$$

  - 特别的，当n=1时二项分布转化为0-1分布。

4. 半不变量基本概念

- 半不变量的原理
  - “半不变量”是概率论中与数理统计中相当重要的一个概念，它与“矩”一样在理论和实践中有着广泛的应用。
  - “半不变量”，起始称作：half-invariants，亦称为累积量（**Cumulants**）。

4. 半不变量基本概念

- 半不变量（**Cumulants**）的定义
  - 如果一个随机变量 累积分布函数是$F(x)$，那么它的**特征函数**可由黎曼-斯蒂尔切斯积分给出：

$$\varphi_\xi(t) = E[e^{it\xi}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{itx} dF_\xi(x)$$

  - 特征函数可以看作是概率密度函数的傅立叶变换。
  - 对特征函数取自然对数，后以MacLaurin级数展开，其中定义K_r为随机变量X的r阶半不变量，也是**随机变量的数字特征**:

$$\ln \varphi_\xi(t) = \sum_{r=1}^{s} \frac{k_r}{r!}(it)^r + o(t^s)$$

4. **半不变量**的基本概念

- 独立随机变量的半不变量的两个性质：
  - **性质1**. 随机变量的和的r 阶半不变量与各变量的r阶半不变量之和相等(r为非负整数)。
  - **性质2**. 随机变量a倍的r 阶半不变量与该随机变量的r阶半不变量的a^r倍相等(r为非负整数)。

- 半不变量（Cumulant）的计算
  - 随机变量的各阶半不变量不能通过其定义直接求出，而是通过求取随机变量的各阶矩**间接**求出。随机变量的各阶半不变量K_r和各阶矩m_r之间有以下递推关系:

$$\begin{cases} k_1 = m_1 \\ k_{r+1} = m_{r+1} - \sum_{j=1}^{r} C_r^j m_j k_{r-j+1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_1 = k_1 \\ m_{r+1} = k_{r+1} + \sum_{j=1}^{r} C_r^j m_j k_{r-j+1} \end{cases}$$

– 由于阶数高的半不变量对求取随机变量概率分布的影响较小，只需求得较低阶半不变量就可以达到计算的准确度:

$$
\begin{cases}
k_1 = m_1 \\
k_2 = m_2 - m_1^2 \\
k_3 = m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3 \\
k_4 = m_4 - 3m_2^2 - 4m_1m_3 + 12m_1^2m_2 - 6m_1^4 \\
k_5 = m_5 - 5m_1m_4 - 10m_2m_3 + 20m_3m_1^2 + 30m_2^2m_1 - 60m_2m_1^3 + 24m_1^5 \\
k_6 = m_6 - 6m_1m_5 - 15m_2m_4 + 30m_1^2m_4 - 10m_3^2 + \\
\qquad 120m_1m_3m_2 - 120m_1^3m_3 + 30m_2^3 - 270m_1^2m_2^2 + 360m_1^4m_2 - 120m_1^6 \\
k_7 = m_7 - 7m_1m_6 - 21m_2m_5 + 42m_1^2m_5 - 35m_3m_4 + 210m_1m_4m_2 - \\
\qquad 210m_4m_1^3 + 140m_1m_3^2 + 210m_2^2m_3 - 1260m_2m_3m_1^2 + 840m_3m_1^4 - \\
\qquad 630m_2^3m_1 + 2520m_1^5m_2 + 720m_1^7
\end{cases}
$$

- 由矩、中心矩求随机变量的分布函数
  - 通过随机变量的各阶矩和各阶半不变量可以间接计算随机变量的概率分布函数$F(x)$和概率密度函数$f(x)$。
  - 连续型随机变量的分布函数用Gram-Charlier级数（或Edgworth级数）求取，以此展开式来计算所需未知量的各项概率指标。
  - 离散型随机变量的分布函数用Von Mises方法求取。

- 由矩、中心矩求随机变量的分布函数
  - 随机变量 的$F(x)$及$f(x)$可以表示为以下形式的Gram-Charlier级数展开式：

$$\begin{cases} F(x) = \phi(x) + c_1\phi'(x) + c_2\phi''(x) + c_3\phi'''(x) + \ldots \\ f(x) = \varphi(x) + c_1\varphi'(x) + c_2\varphi''(x) + c_3\varphi'''(x) + \ldots \end{cases}$$

  - $\varphi(x)$为正态概率密度函数，$H_r(x)$为Hermite多项式，定义如下：

$$\varphi^{(r)}(x) = (\frac{d}{dx})^r \varphi(x) = (-1)^r H_r(x)\varphi(x)$$

– 求得前7项**Hermite多项式**及其前7项**系数c**为：

$$\begin{cases} H_0(x)=1 \\ H_1(x)=x \\ H_2(x)=x^2-1 \\ H_3(x)=x^3-3x \\ H_4(x)=x^4-6x^2+3 \\ H_5(x)=x^5-10x^3+15x \\ H_6(x)=x^6-15x^4+45x^2-15 \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_0=1 \\ c_1=0 \\ c_2=\frac{1}{2}(M_2-1) \\ c_3=-\frac{1}{6}M_3 \\ c_4=\frac{1}{24}(M_4-6M_2+3) \\ c_5=-\frac{1}{120}(M_5-10M_3) \\ c_6=\frac{1}{720}(M_6-15M_4+45M_2-15) \\ c_7=-\frac{1}{5040}(M_7-21M_5+105M_3) \end{cases}$$

- 可以通过Gram-Charlier级数展开式得到累积概率分布：

$$F(x)=\int_{\bar{x}}^{\infty}\varphi(\bar{x})dx+\varphi(\bar{x})[c_3H_2(\bar{x})+c_4H_3(\bar{x})+c_5H_4(\bar{x})+c_6H_5(\bar{x})+\ldots]$$

  – 其中：$F(x)$是随机变量取值大于等于x的概率。

  – 通常，随机潮流需要利用标准正态分布函数推导出Hermite多项式，因此需要对x采取规格化处理，一般表示**规格化的随机变量**为：

$$\bar{x}=\frac{X-\mu}{\sigma}\sim N(0,1)$$

5. 随机潮流计算模型

- 基于半不变量法的随机潮流计算原理
  - 随机潮流并不使用牛顿法对非线性方程组进行多次迭代求解，整个计算过程一步完成，不需要多次迭代求解:
  - 直接在潮流收敛后的稳态运行点处，对电力系统的潮流方程进行线性化展开；
  - 然后对各节点的发电机功率、负荷功率进行概率化注入；
  - 最后利用潮流雅克比矩阵的逆矩阵，即灵敏度矩阵，反过来求解稳态潮流解处的电压、支路功率的概率化指标。

- 节点注入方程的线性化
  - S_0 为Jacobi矩阵的逆矩阵，称为灵敏度矩阵：

$$
\begin{cases}
P_i = V_j \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\
Q_i = V_j \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij})
\end{cases}
$$

$$W_0 + \Delta W = f(V_0) + J_0 \Delta V + \ldots$$

$$\Delta W = J_0 \Delta V$$

$$\Delta V = J_0^{-1} \Delta W = S_0 \Delta W$$

- 支路功率方程的线性化
  - T_0称为支路功率灵敏度矩阵

$$\begin{cases} P_{ij} = -V_i V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) + t_{ij} G_{ij} V_i^2 \\ Q_{ij} = -V_i V_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) + (B_{ij} - b_{ij0}) V_i^2 \end{cases}$$

$$Z_0 + \Delta Z = g(V_0) + \Delta V g'(V_0) + \ldots = g(V_0) + \Delta V G_0 + \ldots$$

$$\Delta Z = G_0 \Delta V$$

$$\Delta Z = G_0 \Delta V = G_0 J_0^{-1} \Delta W = T_0 \Delta W$$

$$T_0 = \left[\frac{\partial g(V)}{\partial V} \bigg|_{V=V_0} \right] J_0^{-1}$$

- 元件的随机潮流计算的概率化模型
  - 电力负荷的随机模型
    - 正态分布（连续分布）

$$\begin{cases} f_{p_l}(P_l)=\dfrac{1}{\sigma_p\sqrt{2\pi}}\exp(-\dfrac{(P_l-\overline{P}_l)^2}{2\sigma_p{}^2}) \\ f_{Q_l}(Q_l)=\dfrac{1}{\sigma_Q\sqrt{2\pi}}\exp(-\dfrac{(Q_l-\overline{Q}_l)^2}{2\sigma_Q{}^2}) \end{cases}$$

  - 发电机的随机模型
    - 离散二项分布（*多状态*）

$$P(X=X_i)=\begin{cases} 1-q & x_i=C_i \\ q & x_i=0 \end{cases}$$

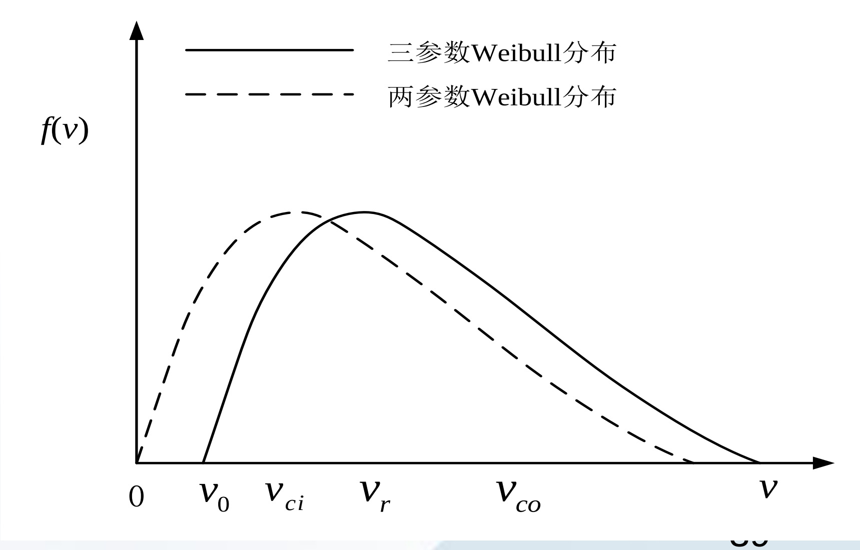
  - 线路和变压器的随机模型
    - 支路故障用0-1分布来模拟

二、风力发电概率化模型

- 风速模型
  - 风速的变化具有随机性，一般可以认为服从考虑位置参数 的**三参数威尔（Weibull）分布**，该分布能够较好地描述多种风速（特别是高风速）地区的风机出力，风速的概率密度函数可表示为：

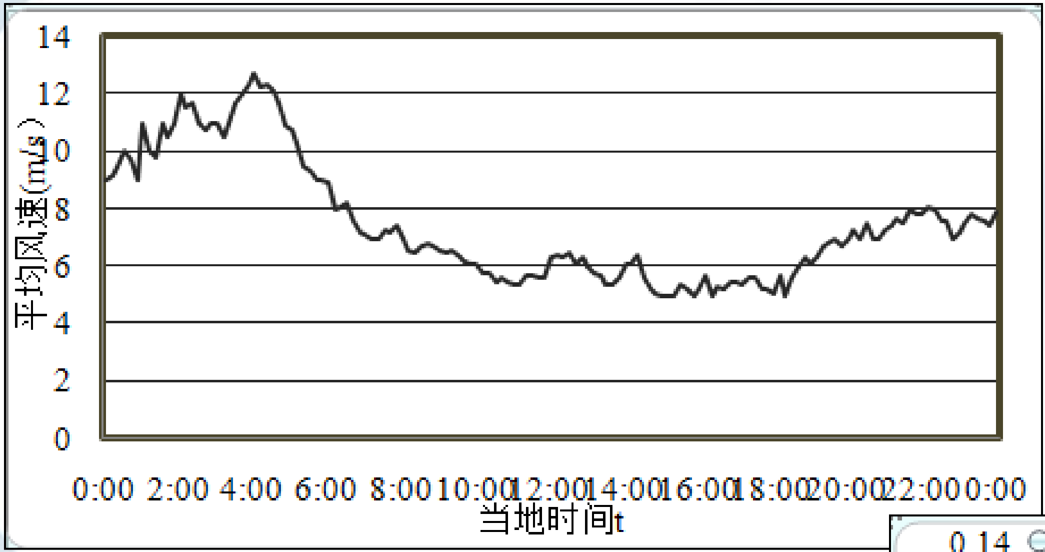
$$f(v)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{v-v_0}{\beta}\right)^{\alpha-1}\exp\left[-\left(\frac{v-v_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right]$$

$$0\le v<\infty,\alpha>0,\beta>0$$



二、风力发电概率化模型

典型日风速参数拟合



冬季典型日风速数据

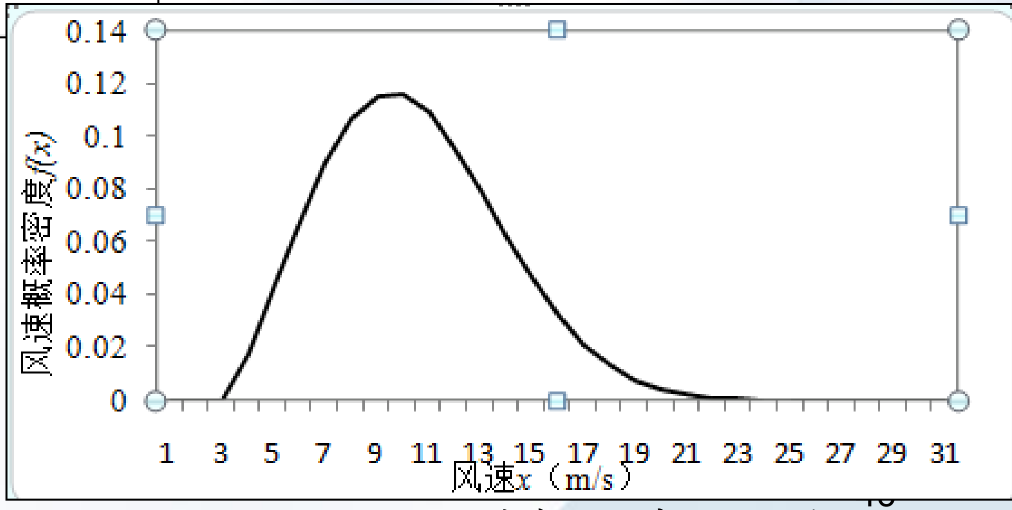
- 通过最小二乘法拟合风速参数，设其**位置参数**：

$$v_0 = 3$$

- 可以得到风速**形状参数**和**尺度参数**：

$$\alpha=2.3079$$

$$\beta=8.1397$$



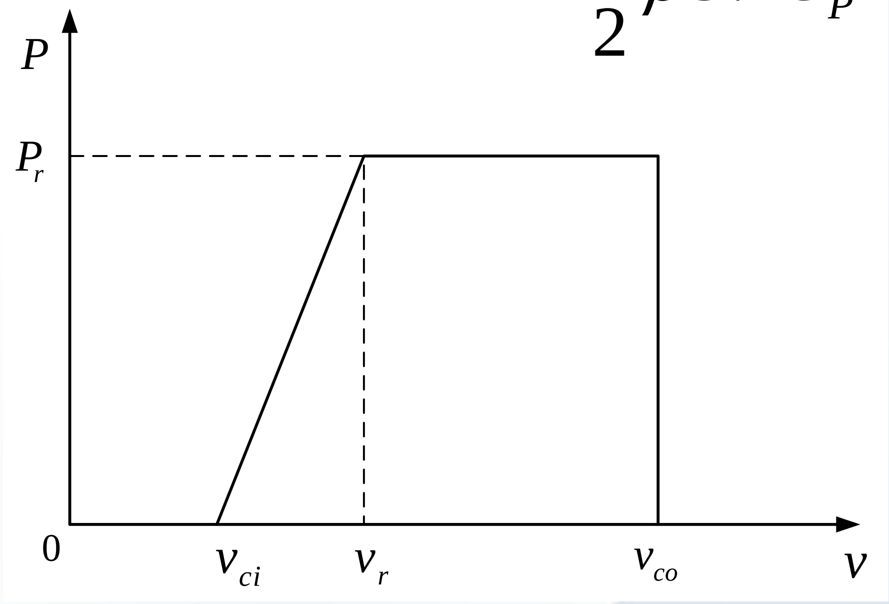
该日风速概率密度函数

风电功率与风速关系

– 风电功率的波动，主要由风速的随机性引起，而且在不同的风速下，风力发电机的功率与风速并非一直保持线性关系，必须首先将风速的随机模型与风电出力的模型结合起来加以考虑，基于线性化近似关系模型：

取近似线性段： $P = \frac{1}{2}\rho S v^3 C_P$

$$P_W = \begin{cases} 0 & v \le v_{ci} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} < v \le v_r \\ P_r & v_r < v \le v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases}$$



风力发电机功率风速曲线

- 综合Weibull风速分布式和功率风速关系式，可以得到风力发电机出力的概率密度函数：

(1) 当$v_0 \le v < v_{ci}$或$v_{co} \le v$时，$P_W = 0$：

$$P(p_w = 0) = \int_{v_0}^{v_{ci}} f(v)dv + \int_{v_{co}}^{\infty} f(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_{ci} - v_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right] + \exp\left[-\left(\frac{v_{co} - v_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right]$$

(2) 当$v_{ci} \le v < v_r$时，$0 < P_W < P_r$：

$$F(p_w) = P(p_w < P_W) = \int_{v_0}^{v_{ci}} f(v)dv + \int_{v_{ci}}^{\frac{P_W - k_2}{k_1}} f(v)dv$$

$$f(p_w) = F'(p_w) = \frac{c}{b}\left(\frac{p_w - a}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{p_w - a}{b}\right)^{c}\right]$$

式中：$a = k_2 + k_1 v_0$，$b = k_1\beta$，$c = \alpha$。

(3) 当$v_r \le v < v_{co}$时，$P_W = P_r$：

$$P(p_w = P_r) = \int_{v_r}^{\infty} f(v)dv = \exp\left[-\left(\frac{v_r - v_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_{co} - v_0}{\beta}\right)^{\alpha}\right]$$

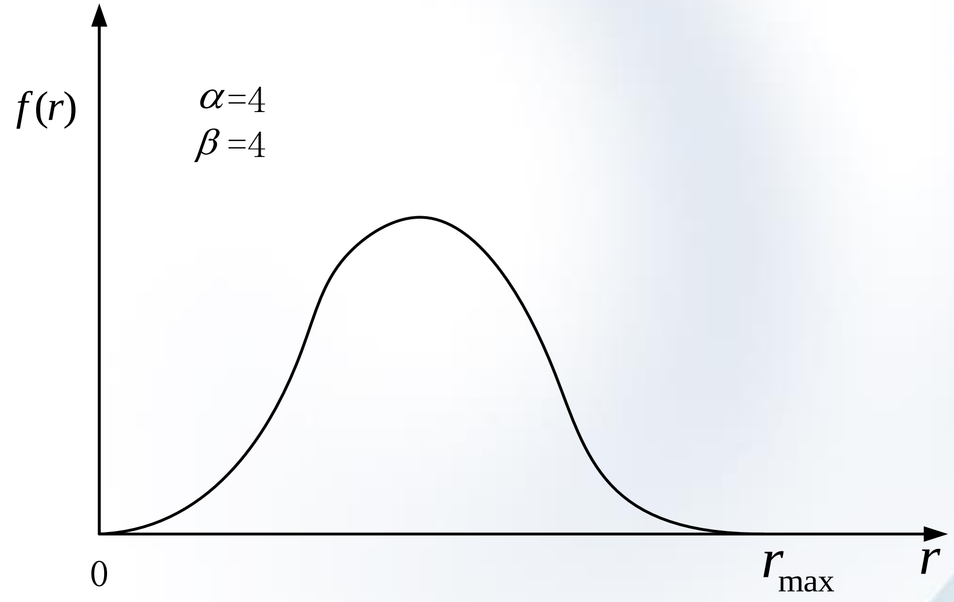
三、光伏发电概率化模型

- 随机潮流中的光伏发电建模
  - 太阳能电池能够通过光生伏特效应将太阳能转化为电能，因此光伏阵列的出力和太阳光照强度关系紧密。由于光照强度具有一定的波动性，光伏阵列的出力也是随之波动的。
  - 反映一段时间内（1h至几h）太阳能光照强度的变化，通常以**贝塔（Beta）分布**来描述。

光伏电站随机出力模型

- 服从Beta分布的光照强度概率密度函数为：

$$\begin{cases} f(r) = \dfrac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\dfrac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\dfrac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \\ \Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1}e^{-t}dt \end{cases}$$



一定时间内太阳光照强度分布曲线

位置和形状参数获取

- 某一段时间内的太阳光照强度Beta分布的均值和方差通过统计拟合得到，其数值上又可表示为：

$$\mu = E(X) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

$$\sigma^2 = D(X) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$$

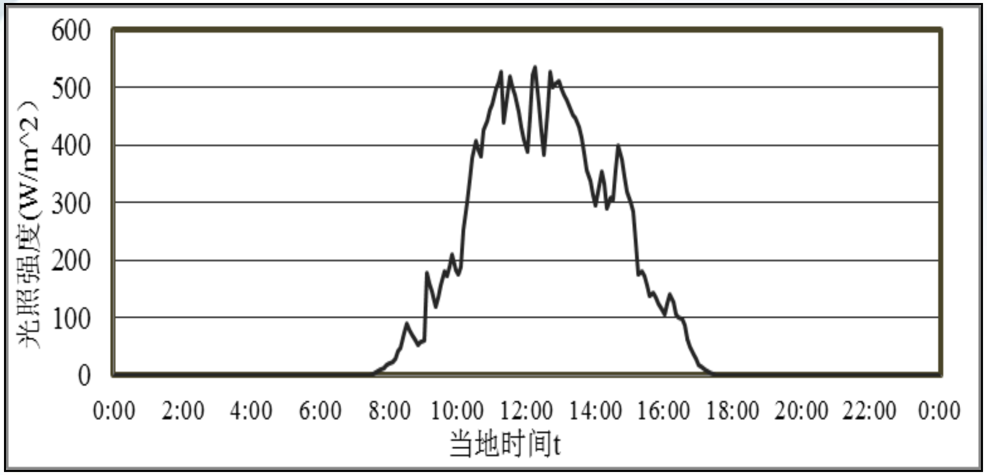
- 通过推导得到Beta分布的**形状与尺度参数**：

$$\alpha = \mu\left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1\right]$$

$$\beta = (1-\mu)\left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1\right]$$

三、光伏发电概率化模型

典型日光照强度参数拟合

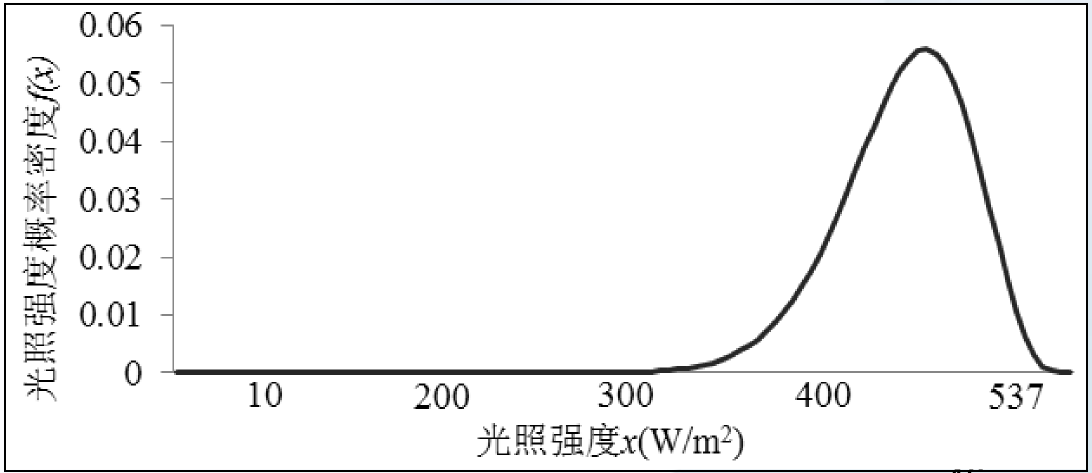


冬季典型日光照数据

- 通过最小二乘法拟合，可以得到光照强度的**形状参数**和**尺度参数**：

$$\alpha=22.5787$$

$$\beta=5.1627$$



该日光照概率密度函数

光伏阵列出力的概率密度函数

- 一般情况下，光伏发电系统都会安装MPPT跟踪控制以保证输出功率保持最大。则光伏电池输出的功率与单位面积能接受的太阳能近似表达为线性关系：

$$P_{PV} = A\eta R_a$$

Ra——光照强度/ W·m^{-2}；
A——太阳板总面积/ m^2；
η——总的光电转化效率。

- 因此，光伏发电出力的概率密度函数为：

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\frac{P_{pv}}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\frac{P_{pv}}{P_{\max}}\right)^{\beta-1}$$

离散化处理

- 为了保证计算精度，实际工程计算中一般将光伏发电出力曲线概率密度函数做离散化处理，得到离散的概率函数：

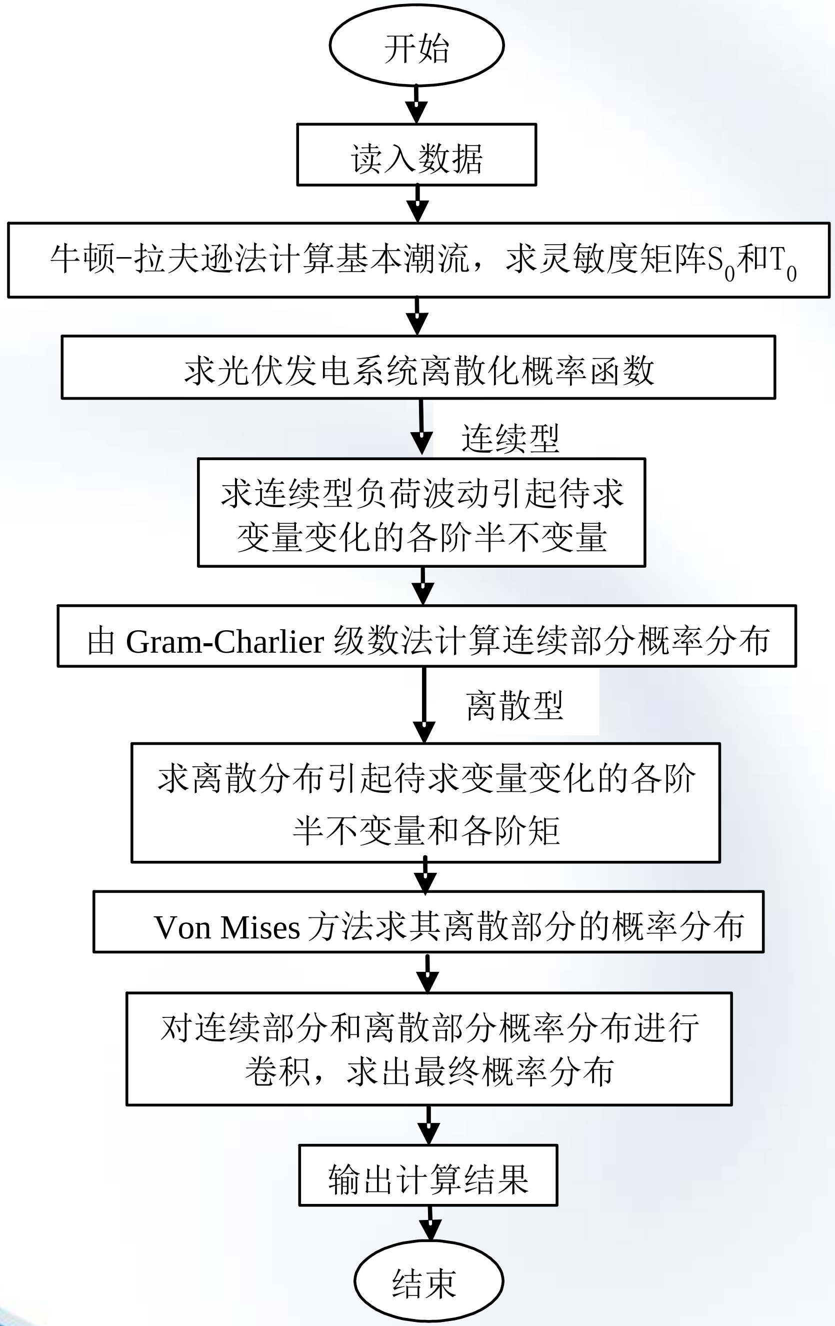
$$P(P_{PV} = p_{pv})$$

四、随机潮流计算流程

- 随机潮流的步骤如下：
- 1) 读入数据。读入原始数据包括一般潮流计算所需的发电机、负荷、支路数据，以及有关随机量的信息，例如对光伏发电系统要结合气象数据给出光照强度在一段时间内的期望和方差，对正态分布负荷要给出期望值和方差，对服从二项分布的发电机需要给出随机停运容量及概率，对服从二项分布的线路数据要给出线路故障率等。
- 2) 用Newton-Raphson法进行传统潮流计算，并求出潮流方程线性化计算所需的 雅克比矩阵J_0以及状态变量X_0，从而求出节点电压与节点注入功率的灵敏度关系矩阵S_0以及支路功率与注入功率的灵敏度关系矩阵T_0。

四、随机潮流计算流程

- 3) 求光伏发电系统离散化概率函数。根据读入光照强度在一段时间内的期望和方差，拟合光伏阵列的离散化概率函数。
- 4) 计算负荷功率波动的半不变量，并通过灵敏度矩阵计算注入功率半不变量，然后用Gram-Charlier级数展开式求其连续部分的概率分布。
- 5) 求离散分布光伏发电系统出力、发电机随机停运以及线路随机故障引起的待求变量变化的各阶半不变量，并求出待求变量变化的各阶矩，用Von Mises方法求其离散部分的概率分布。
- 6) 用合成概率分布方法进行计算，求出最终的概率分布。
- 7) 输出结果计算结束。



含新能源光伏发电系统随机潮流计算流程图