



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# Lecture 12

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

# 第五章 新能源电力系统规划

## 5.1 负荷预测与新能源发电功率预测

熟悉电力负荷曲线，掌握新能源的出力预测技术。

## 5.2 新能源发电的容量可信度概念

熟悉新能源容量可信度指标及随机生产模拟方法。

## 5.3 新能源穿透功率极限分析

了解新能源的穿透功率极限分析方法和简单电源规划方法。

## 5.4 新能源并网后电力系统调峰及消纳能力计算

了解新能源对系统调峰、备用，消纳能力分析计算。

## 5.5 新能源电力系统可靠性计算

熟悉传统电力系统及含新能源电力系统可靠性计算。

## 5.6 新能源发电效益与工程经济分析

了解新能源发电自身效益，熟悉工程经济分析基础方法。

# 传统电力系统规划基本内容

- 电力系统规划的基本方法和标准
- 电厂选址、变电所选址及输电线路路径选址
- 电力负荷预测
- 电力电量平衡
- 电源规划
- 电网规划
- 无功规划
- 自动化规划
- 经济评价方法
- 电力系统可靠性原理及在电力规划中的应用
- 电力市场基本概念及在电力规划中的应用

# 一、传统电力系统规划的内涵

## • 电力系统的可靠性（Reliability）

- 1) 对用户供电的充裕性（Adequacy）。供电的充裕性是指系统满足一定数量负荷用电的不间断性。国际上目前普遍采用电力不足概率（或称失负荷概率LOLP）来作为对电力系统供电充足性的评价标准；而我国一直沿用发电装机容量备用率的概念来表征电源的充足程度。
- 2) 对用户供电的安全性（Security）。供电的安全性是指系统在保持向用户安全稳定供电时能够承受故障扰动的程度。电力系统发展设计的主要任务之一就是通过电力系统的安全校核计算，包括静态的N-1安全检查和暂态的稳定计算来保证系统达到一定的安全标准。

# 一、传统电力系统规划的内涵

## • 电力系统的经济性

- 电力系统建设的经济性包括燃料的输送和供应，电能的生产和输送，发、送、变电设备的一次投资和折旧，能量输送过程中的损耗，以及其他运行费用等。

- 规划设计中的系统，系统运行费用是以生产模拟方法来计算的，总的要求是年运行费用最低。

- 对跨区联网送电工程及远距离送电和建厂比较等大型系统规划设计项目还应进行项目的财务分析，以确定其贷款偿还能力和经济效益。

# 一、传统电力系统规划的内涵

- 电力系统的灵活性

- 1) 系统对**基本建设条件变化**适应的灵活性:

- 电力系统规划设计阶段将会遇到很多的不确定因素，规划设计完成以后到基本建设项目实施投产，系统中电源、负荷及网络情况将可能发生某些变化，设计系统应能够在修改不大的情况下仍然满足应有的技术经济指标，这就是电力系统对基本建设条件变化适应的灵活性。

- 2) 对电力系统**在运行方面的灵活性**要求:

- 在生产运行中，电网和厂、所电气主接线以及有功、无功电源应该能够在各种正常运行、检修包括事故情况下灵活地调度以应付各种元件的投退，从而保证系统安全稳定地向用户供应充足的电力，这是对电力系统在运行方面的灵活性要求。在系统设计阶段这是衡量系统设计方案优劣的重要技术条件之一。

# 传统电力系统规划VS. 新能源规划

- 科学合理的电力系统规划是电力系统安全、可靠、经济、灵活运行的前提。

传统电力系统规划  
问题：

- 负荷预测
- 电力电量平衡  
(调度运行)
- 电源规划
- 电网规划等



新能源接入对系统规  
划带来的新问题：

- 出力预测
- 容量可信度  
(可调度容量)
- 电源规划+穿透  
功率极限
- 电网规划等

## 二、电力系统的负荷预测技术

### 1. 负荷预测（Load Forecasting）

- 1) 概念

- 根据系统的运行特性、增容决策、自然条件与社会影响等诸多因素，在满足一定精度要求的条件下，确定未来某特定时刻的负荷数据。



# 1. 负荷预测

- 2) 负荷预测的意义:

- 负荷预测是电力系统规划的基础。

- 如果负荷**预测偏低**会引起电力供应紧张、供电**可靠性**下降;
    - 如果负荷**预测偏高**将导致发输变电设备不能充分利用, 造成大量资金积压, 影响系统**经济性**。

- 3) 电力负荷预测按照预测周期的分类
  - 超短期负荷预测：是指未来1h以内的负荷预测，如在安全监视状态下，需要5~10s或1~5min的预测值；预防性控制和紧急状态，需要10min至1h的预测值。
  - 短期负荷预测：是指日负荷预测和周负荷预测，分别用于安排日调度计划和周调度计划，包括确定机组启停、水火电协调、联络线交换功率、负荷经济分配、水库调度和设备检修等，对短期预测，需充分研究电网负荷变化规律，分析负荷变化相关因子，特别是天气因素、日类型等和短期负荷变化的关系。

- 3) 电力负荷预测按照预测周期来分类：
  - 中期负荷预测：是指月至年的负荷预测，主要是确定机组运行方式和设备大修计划等。
  - 长期负荷预测：是指未来3~5年甚至更长时间内的负荷预测，主要是电网规划部门根据国民经济的发展和对电力负荷的需求，所作的电网改造和扩建工作的远景规划。对中、长期负荷预测，要特别研究国民经济发展、国家政策等的影响。

- 4)按照预测的结果，电力负荷预测可分为最大负荷功率、负荷电量及负荷曲线的预测；
- 5)负荷预测的主要用途：
  - ① 确定电力系统发电设备及输变电设备的容量；
  - ② 选择适当的机组类型；
  - ③ 合理的电源结构；
  - ④ 确定燃料计划；
  - ⑤ 安排电力系统的调峰备用容量；
  - ⑥ 辅助发输电设备的协调运行等。

负荷预测是在满足一定精度的条件下，确定未来某时刻的负荷数值，为( )服务。

- A 电力能源规划
- B 电力生产计划
- C 电力能源节约
- D 系统稳定分析

## 2. 电力负荷曲线

- 定义：

- 描述电力负荷随时间变化规律的曲线，称作**负荷曲线**。

- 分类：

- **按持续时间**

- 日负荷曲线、周负荷曲线和年负荷曲线等；

- **按负荷范围**

- 个别用户负荷曲线、变电所负荷曲线、发电厂负荷曲线、电力系统负荷曲线等；

- **按负荷性质**

- 有功负荷曲线和无功负荷曲线。

- 影响负荷变化的因素：

- 作息时间的影晌

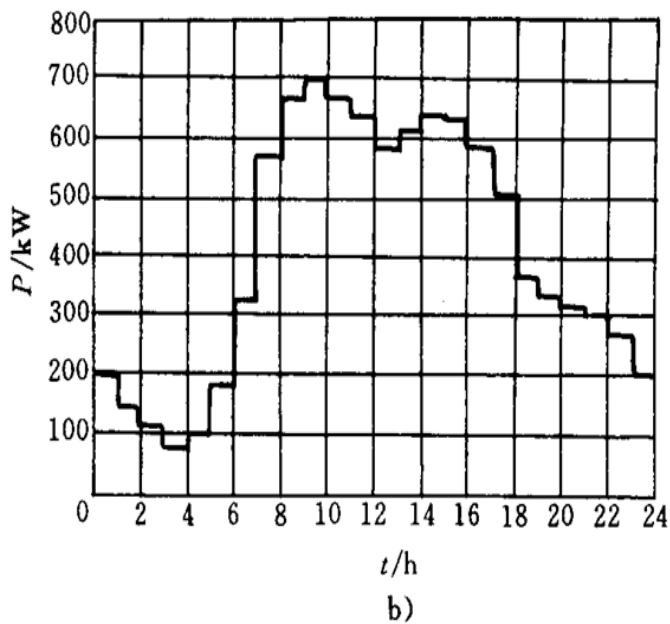
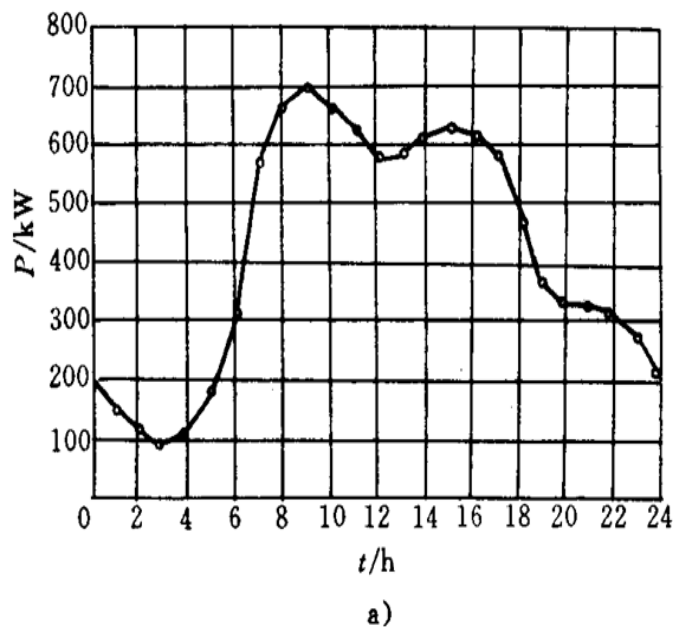
- 生产工艺的影晌

- 气候的影晌

- 季节的影晌

## • 日负荷曲线

- 主要用于研究电力系统的日运行方式，如经济运行、调峰措施、安全分析、调压和无功补偿等。
- 分类：逐点描绘的负荷曲线；阶梯形负荷曲线。

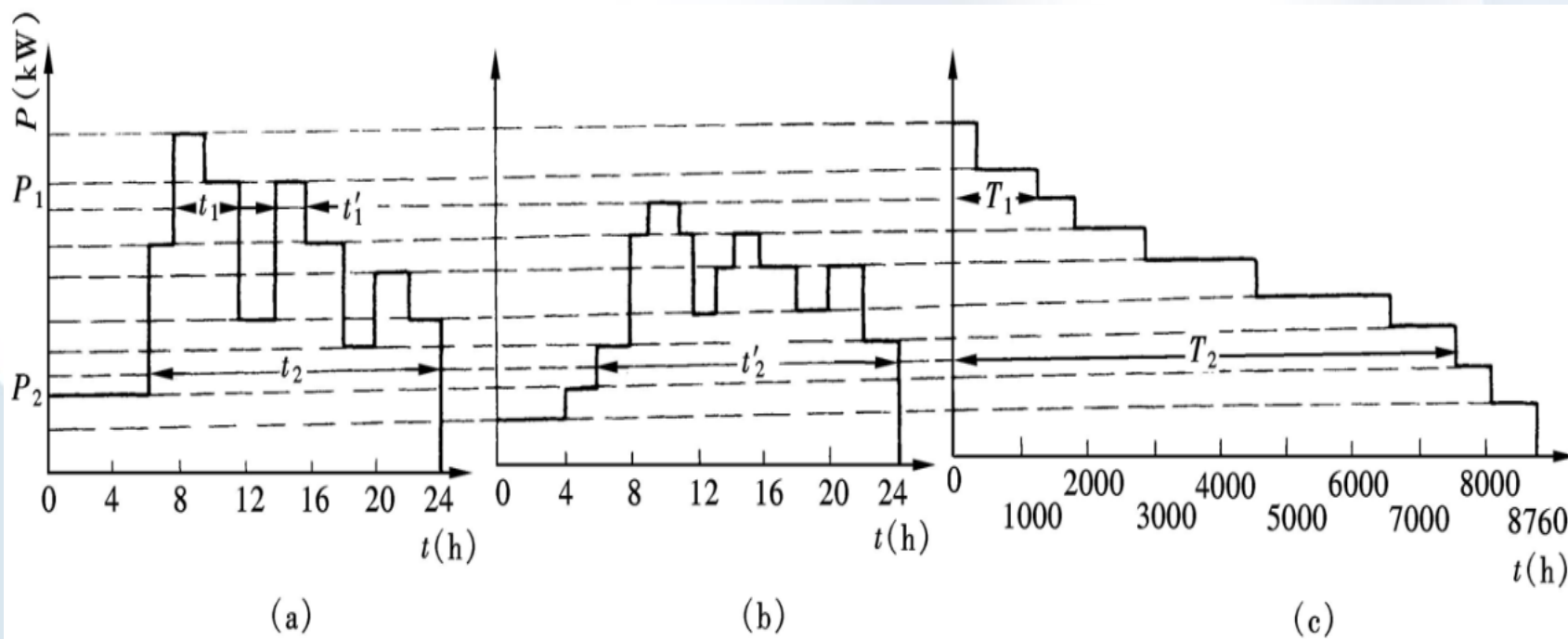


两种典型日负荷曲线图



## • 年负荷持续时间曲线

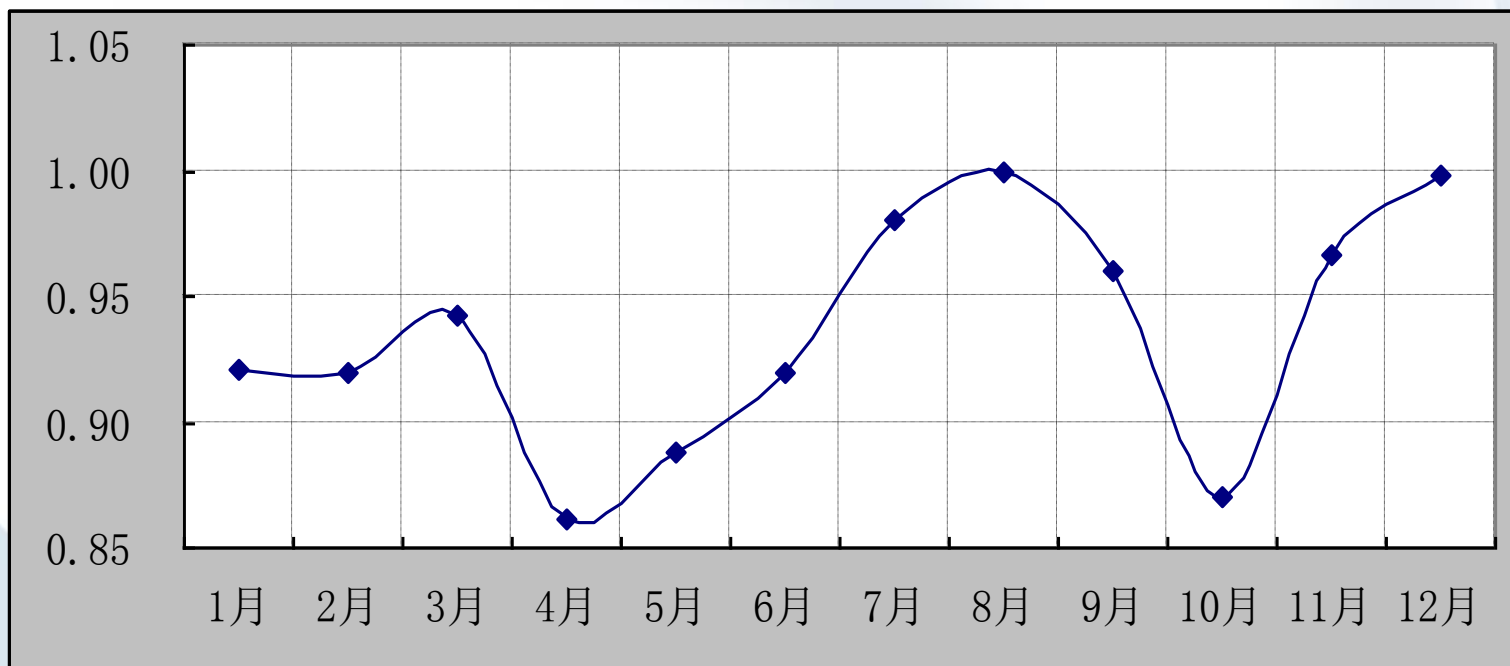
$P_1$ 在年负荷曲线上所占的时间 $T_1=200(t_1+t'_1)$ ,  
 $P_2$ 在年负荷曲线上所占的时间 $T_2=200t_2+165t'_2$ ,  
其余类推。



由夏冬日负荷曲线求年负荷持续时间示意图

## • 年最大负荷曲线

- 按全年每月的最大负荷绘制，主要用于制定电力系统发电设备的检修计划、退役计划以及研究延迟投建新发电机组的可能性。



年最大负荷曲线图

- 关键物理量:

- 年平均负荷  $P_{av}$

$$W_a = 8760 P_{av} \text{ (kW}\cdot\text{h)}$$

- 年最大负荷  $P_{\max}$

- 年最大负荷利用小时  $T_{\max}$

$$W_a = T_{\max} P_{\max} \text{ (kW}\cdot\text{h)}$$

- 日平均负荷率

$$\gamma = P_{d.av} / P_{d.\max}$$

- 日最小负荷率

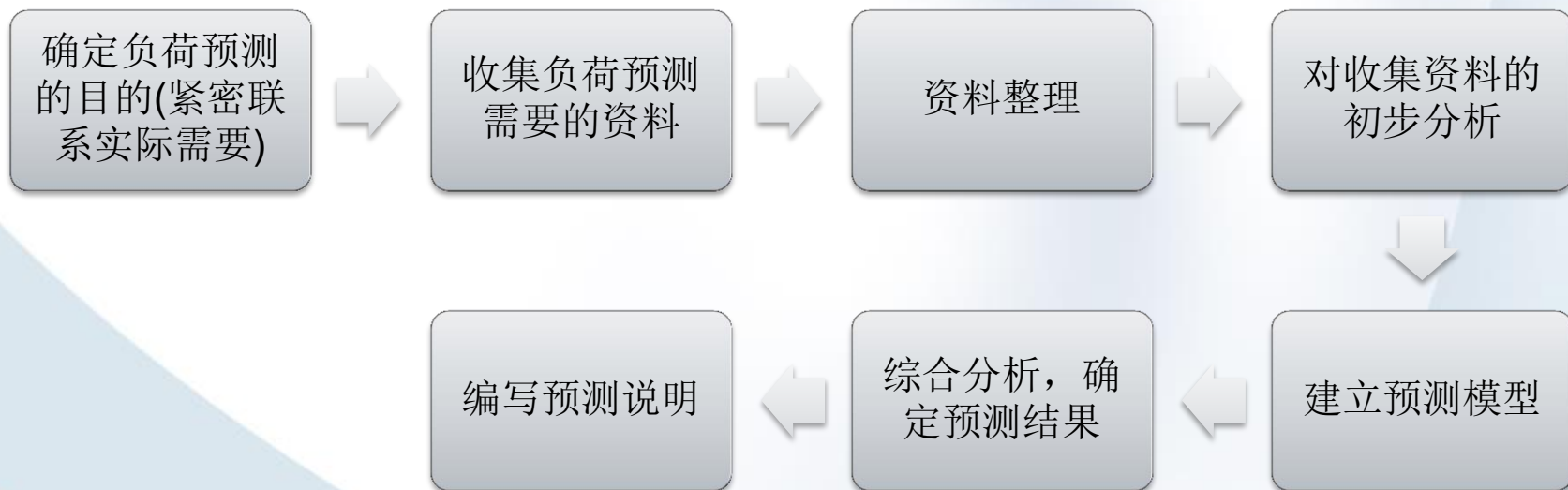
$$\beta = P_{d.\min} / P_{d.\max}$$

小于日最小负荷的部分称为**基荷**，大于日平均负荷的部分称为**峰荷**，两者之间的部分称为**腰荷**。

### 3. 电力负荷预测方法

#### 负荷预测的基本流程

负荷预测工作的关键在于**收集大量的历史数据**，建立科学有效的预测模型，采用有效的算法，以历史数据为基础，进行大量试验性研究，总结经验，不断修正模型和算法，以真正反映负荷变化规律。



# 数据处理的基本内容

(1) **数据补全**：可使用人工填写空值、使用最可能的值填充、使用一个全局常量填充等方法。

(2) **数据噪声处理**：由于数据录入或测量仪表等原因可能使数据存在较大的偏差，为了保证预测模型的有效性，必须对异常数据进行相关处理，常用的方法有分箱、聚类、回归、计算机和人工检查结合四类方法。

(3) **负荷数据预处理**：对历史负荷数据资料中的异常值的平稳化以及缺失数据的补遗。主要采用水平处理、垂直处理方法。

# 传统直观分析预测法

## (1) 单耗法

选取适当的**单耗**，当已知某种产品的产值（产量）规划值时，就可求出规划区某行业生产该产品的总用电量：

$$W = \sum_{i=1}^m q_i G_i$$

## (2) 需求系数法

当已知用户的用电设备装配容量时，根据有关设计手册查得同类用户的**需求系数**，则由下式可求出该用户的实际最大负荷：

$$P_{\max} = K_x P_e$$

## (3) 增长率法

在分析历史资料的基础上，根据未来的发展趋势，选择一个适当的电量**年均增长率**，由下式即可求得目标年（ $n$ ）的电量预测值：

$$W_n = W_0 (1 + V_w)^n$$

# 传统直观分析预测法

## (4) 弹性系数法

作远景规划预测时，可采用弹性系数法，即在分析原有历史弹性系数的基础上，选择一个远景年的弹性系数，若知目标年的国民经济总产值，则预测的目标年的用电量为

$$W_n = W_0 (1 + K_E V_Y)^n$$

## (5) 面负荷密度法

若已知某城市未来城区的面积为 $S$  ( $\text{km}^2$ 或 $\text{m}^2$ )，参照规模相类似城市的面负荷密度 $\varphi$  ( $\text{kW}/\text{km}^2$ )，可估算出规划年的负荷功率 $P$ 为

$$P = \varphi S$$

## (6) 综合用电水平法

按照预测的人口数及每人平均耗电量来预测居民总用电量。

## (7) 分行业预测法

分别对生活用电和产业用电进行预测，相加得到总需求电量的预测。

# 现代负荷预测方法

- 现代负荷预测方法可归纳为三大类：
  - 1) 外推法（趋势外推法、时间序列法）
    - 外推法是假设未来负荷的增长模式或规律是过去增长模式或规律的继续。
    - 把负荷的历史数据与某种趋势曲线相拟合，并以此趋势曲线来预测未来某一时刻的电力负荷值。



## 最小二乘法 (趋势外推法)

### ◇ 预测负荷序列的发展趋势

◇ 把负荷序列的发展趋势用方程式表示出来，进而利用趋势方程式来预测负荷未来的变化。

### ◇ 特点

◇ 原理简单易懂；

◇ 预测速度快；

◇ 外推特性好；

◇ 能反映负荷变化的连续性；

◇ 对历史数据要求高，适合负荷序列波动不大的平稳时间序列的情况，无法详细地考虑各种影响负荷的因素。

## 我国某地区实际发电量的增长情况

|     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 序号  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 年份  | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 |
| 发电量 | 1.0  | 1.07 | 1.16 | 1.21 | 1.27 | 1.37 | 1.47 | 1.59 | 1.75 | 1.95 |

- 在表中发电量取的是标么值，以1983年的发电量为基准。在预测时为方便起见，采用表中的序号作为自变量。
- 为了用外推法预测今后的发电量，需要寻求 $y=f(x)$ 的一个近似表达式。从几何上讲，就是希望根据表中所列的一组离散点  $(1, 1.0)$  ,  $(2, 1.07)$  , ...,  $(10, 1.95)$  , 组成  $y=f(x)$  的一条拟合曲线。

## 最小二乘法 (趋势外推法)

- 选定函数来逼近 $f(x)$ , 则两者之间的误差应越小越好。

$$\delta_i = \phi(x_i) - f(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

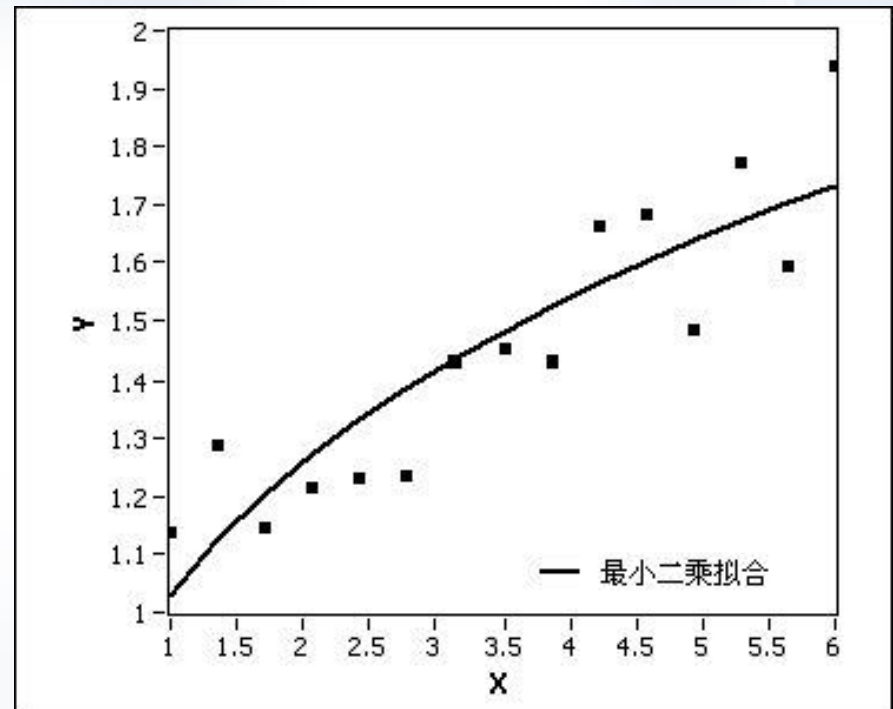
- 在一般情况下要使  $(i=1, 2, \dots, n)$  各点的误差全都为零是不可能的。因此通常归结为要求在各点绝对误差的平方和最小。

$$S = \min \sum \delta_i^2 = \min \sum_{i=1}^n [\phi(x_i) - f(x_i)]^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

# 最小二乘法 (趋势外推法)

- 利用最小二乘法进行曲线拟合时，首先要选定一个函数的类型(根据经验):

- ① 直线;
- ② 抛物线;
- ③ 三阶曲线;
- ④ 指数曲线;
- ⑤ 几何曲线;
- ⑥ 增长曲线;
- ⑦ **Compertz**曲线。



# 指数平滑法（时间序列法）

- 确定性的时间序列分析技术

$$S_t = \alpha y_{t-1} + (1-\alpha)S_{t-1}$$

$S_t$ 是时间 $t$ 的平滑值；

$y_{t-1}$ 是时间 $t-1$ 的实际值；

$S_{t-1}$ 是时间 $t-1$ 的平滑值；

$\alpha$ 是平滑常数，其取值范围为 $[0,1]$ 。

- $S_t$ 是  $y_{t-1}$ 和  $S_{t-1}$  的加权算术平均数；
- $S_t$ 有逐期追溯性质，可探源至  $S_1$  为止，包括全部数据，因平滑常数  $\alpha$  常以指数形式递减，故称指数平滑法；
- 上式具有递推性质；
- 初始值  $S_1$  的确定，是指数平滑过程的一个重要因素。

- 初值 $S_1$ 的确定：
  - 数据较少时可用全期平均、移动平均法；
  - 数据较多时，可用最小二乘法。
- 指数平滑常数 $\alpha$ 的取值：
  - 平滑常数决定了平滑水平以及对预测值与实际结果之间差异的响应速度。

# 指数平滑法（时间序列法）

- 二次指数平滑法的预测模型：

对一次指数平滑值再作一次指数平滑的方法。

$$S_t^{(2)} = \alpha S_t^{(1)} + (1 - \alpha) S_{t-1}^{(2)}$$

- 线性指数平滑法：

$$\begin{cases} \hat{Y}_{t+T} = \alpha_t + b_t \cdot T \\ \alpha_t = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)} \\ b_t = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (S_t^{(1)} - S_t^{(2)}) \end{cases}$$

$S_t^{(2)}$   $S_{t-1}^{(2)}$  分别为 $t$ 期和 $t-1$ 期的二次指数平滑值；

$\alpha$ ——平滑常数；

$T$ ——预测超前期数。

### 3. 电力负荷预测方法

- 负荷预测方法可归纳为三大类：

#### – 2) 相关法（回归分析法）

- 相关法以电力负荷与选定的有关社会或经济因素的内在关系为基础，通过相关因素的发展趋势来预测未来电力负荷的需求。
- 寻求电力负荷随相关变量变化相互关系的趋势曲线，其自变量可以为产值、人口、产量、土地面积等。



### 3) 其他智能类负荷预测方法：

- 灰色模型法
- 专家系统法
- 神经网络法
- 模糊预测法
- 支持向量机预测方法
- 卡尔曼滤波方法
- 小波分析预测方法
- 混沌预测方法
- 概率预测法
- 组合模型预测方法等

# 三、新能源电力系统规划中的预测技术

## 1. 风电预测技术

### • 1) 意义

- 有助于预判风电功率变化趋势
- 有助于降低风电功率不可控性对电力系统的影响
- 减少常规电源调度计划安排的偏差
- 提高电力系统运行安全性和经济性
- 提高系统的风电接纳能力
- 促进风能的大规模开发利用

- 2) 分类

- 按预测时间划分

- 超短期、短期、中期、长期

- 按空间范围划分

- 单机预测、单风电场预测、区域风电场预测

- 按建模对象划分

- 基于风速和直接风功率两种预测方法

- 按所采用的预测模型划分

- 采用统计和机器学习模型预测、采用物理模型预测

## ◇ 一般的风速预测方法

- ①**持续预测法**：当前时刻的风速值即为下一时刻的预测值。
- ②**卡尔曼滤波法**：建立以风速为变量的预测模型。
- ③**随机时间序列法**：通过时间序列的历史数据，经过模型识别、参数估计、模型检验最后推导出预测模型。
- ④**人工神经网络法**：通过人工神经网络，可以实现联想记忆、非线性映射、分类与识别、优化计算、知识处理等功能。
- ⑤**模糊逻辑法**：应用人的专业知识建立模糊规则库，然后通过选用一个线性模型逼近非线性动态变化的风速来预测。
- ⑥**空间相关性法**：考虑多个风电场的风速空间相关性来进行预测。

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_P$$

考虑到风机风速和风电功率之间存在的非线性函数关系，风速预测值的微小误差将产生较大的功率值误差。

## ◆ 直接风电功率的预测方法

- 一是利用风功率的历史数据，仿照上述风速预测方法建立预测模型；
- 二是利用影响功率各要素的历史数据，如风速大小、风向、温度、气压等直接预测风电功率。

# 统计模型预测

◆ 不考虑风速变化的物理过程，采用一定的数学统计方法，在历史数据与风电场输出功率之间建立一种映射关系，以此来对风电功率进行预测的方法称为统计预测方法。

## ◆ 1) 基于确定性时序模型的预测方法

通过找出风电功率历史数据本身在时间上的相关性来进行风电功率预测。

卡尔曼滤波法、自回归滑动平均模型的时间序列法 (Auto-Regressive and Moving Average Model, ARMA)、指数平滑法等。

## ◆2) 基于智能类模型的预测方法

实质是根据人工智能方法提取风电功率变化特性，进而进行风电功率预测。

小波分析法、人工神经网络法、支持向量机回归法、模糊逻辑法等。

◆统计方法不需要考虑大气运动特性，所用数据单一，对于超短期或短期的风电功率预测，结果可以满足精度要求。

◆但对于提前更长时间的预测，预测结果精度往往不足，而且该类方法需要长期的测量历史数据、大量的数据处理工作，以及额外的训练学习。

# 物理模型预测

- 根据数值天气预报系统（NWP）的预测结果得到风速、风向、气压、气温等天气数据，然后根据风电场周围等高线、粗糙度、障碍物、温度分层等信息计算得到风电机组轮毂高度的风速、风向等信息，最后根据风电场的功率曲线计算得到风电场的输出功率。
- 物理方法不需要大量的测量数据，但要求对大气的物理特性及风电场特性有准确的数学描述，这些数值天气预报系统相关的方程求解困难，计算量大。
- 由于NWP每日只更新几次，故物理预测方法更适合于6h以上的短期和中期预测。



## 2. 光伏功率预测技术

### ◆意义：

- ◆统筹安排常规电源和光伏发电的协调配合；
- ◆适时地调整调度计划；
- ◆合理安排电网运行方式；
- ◆有效地减轻光伏接入对电网的不利影响，提高电力系统运行的安全性和稳定性；
- ◆降低电力系统的旋转备用容量和运行成本，以充分利用太阳能资源，获得更大的经济效益和社会效益。

## ◇ 1) 太阳辐射强度预测

- 太阳辐射是使得光伏电池产生伏特效应的直接影响因素，辐射强度的大小直接影响光伏电池的出力大小。

$$P = \eta SI [1 - 0.005 \times (T - 25)]$$



通过预测的太阳辐射强度，计算光伏发电功率！

- 但太阳辐射强度的变化受季节、观测日期、观测时间、太阳时角、地理位置、观测时刻的大气状况、气温、地表温度及云量等因素影响，存在较大随机性。

## ◇ 2) 晴空指数预测(Clearness Index)

- Perez conversion model公式:

$$Irr = CI \cdot [TSI \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cdot \cos(SZA)]$$

- 先预测晴空指数 $CI$ ;
- 全球水平面辐射强度指标 $Irr$ : 可从晴空指数 $CI$ , 长期平均地外太阳辐射强度 $TSI$ , 平均日-地距离 $r_0$ , 当前时刻的日-地距离 $r$ , 和当前时刻的太阳天顶角 $SZA$ 计算得到。

### ◇ 3) 直接光伏出力预测

#### • 模仿负荷预测的**外推法**和**相关法**:

##### — 时间序列法

- 将光伏发电量历史数据按时间顺序排列成时变的统计序列，建立随时间变化的变化模型，并将**模型外推**进行预测。

##### — 回归分析法

- 光伏发电历史数据作为自变量，光伏发电量预测值作为因变量，将二者的关系量化成为**相关系数**，建立回归方程，完成预测。

##### — 其它智能类方法

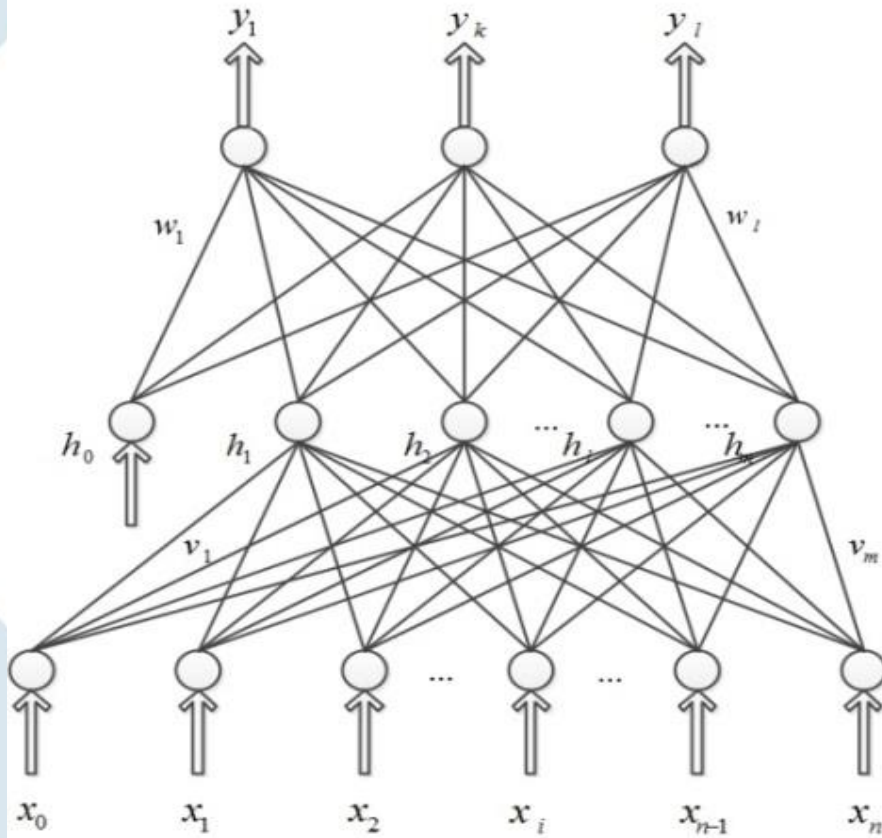
# 光伏功率预测主要方法：

- ◆ 马尔可夫链模型（时间序列法）
- ◆ 灰色预测模型（时间序列法）
- ◆ 多元线性回归模型（回归分析法）
- ◆ 支持向量机（智能类算法）
- ◆ 人工神经网络模型（智能类算法）
- ◆ 能模拟复杂的非线性系统，函数逼近能力良好，具有很强的学习能力和容错能力。

# BP神经网络预测模型的基本原理

- 神经网络方法的特点：
  - 能适应非线性动力系统；
  - 存储各神经元之间的链接权值；
  - 具有很强的自学习能力；
  - 具有很好的鲁棒性和容错能力；
  - 调整各层神经元之间的权值，以达到良好的解决非线性目标函数逼近问题的能力；
  - 神经网络结构简单，完成一次权值和阈值的修正所需时间短。

# BP神经网络的结构



BP神经网络结构图

$$P = \eta SI [1 - 0.005 \times (T - 25)]$$



$$P = f(I, T, H, W)$$

即：天气类型、最高温度、最低温度、平均温度、最大湿度、最低湿度、平均湿度和平均风速等。



学习算法采用误差的梯度下降算法 (Gradient Descent Algorithm) :

$$E = \frac{1}{2} (\mathbf{t} - \mathbf{o})^T (\mathbf{t} - \mathbf{o}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (t_k - o_k)^2$$

# BP神经网络学习算法的改进

## ◆ 增加动量项

- ◆ 从前一次权值修正量中取出一部分迭加到本次权值修正量中，可以提高收敛速度，改进训练学习效率。

## ◆ 自适应调节学习步长

- ◆ 误差曲面“平坦”区域，太小会增加学习次数，希望步长有所增大；收敛到极小值附近区域，太大会发生振荡，希望步长有所减小。

## ◆ 交叉检验

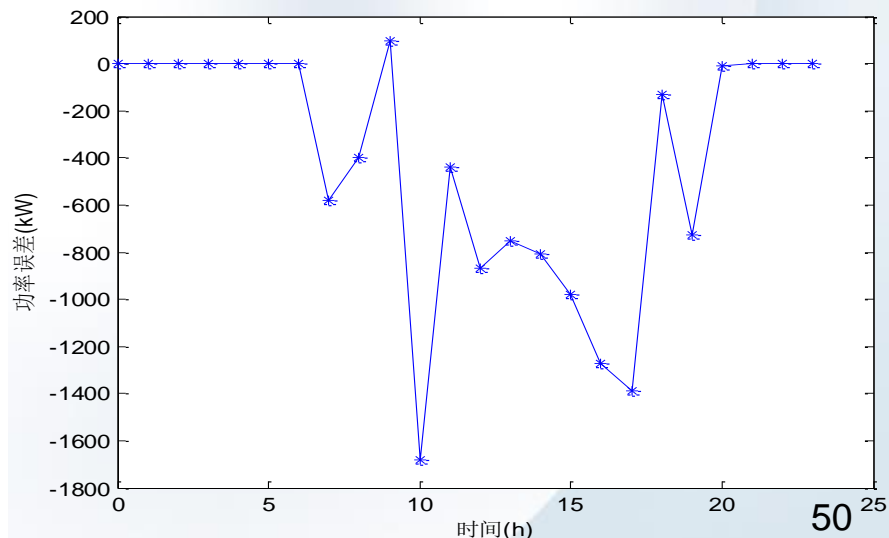
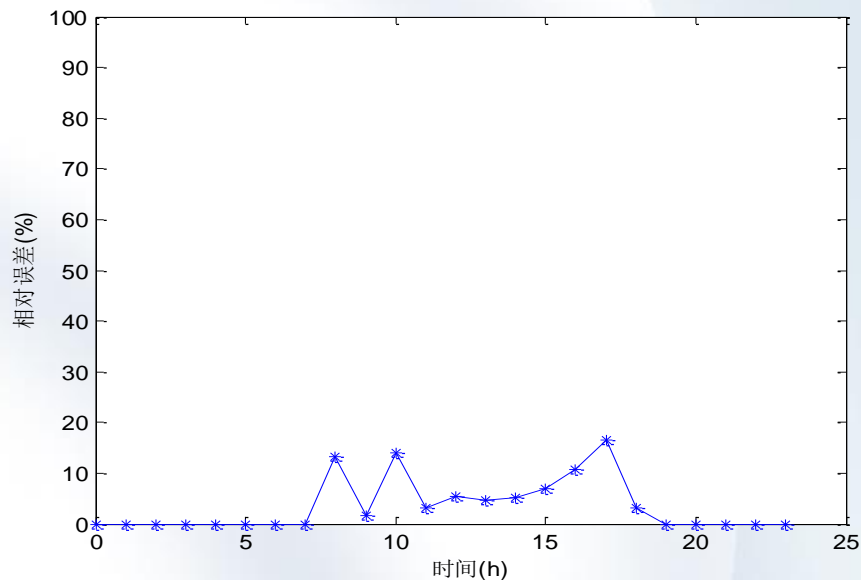
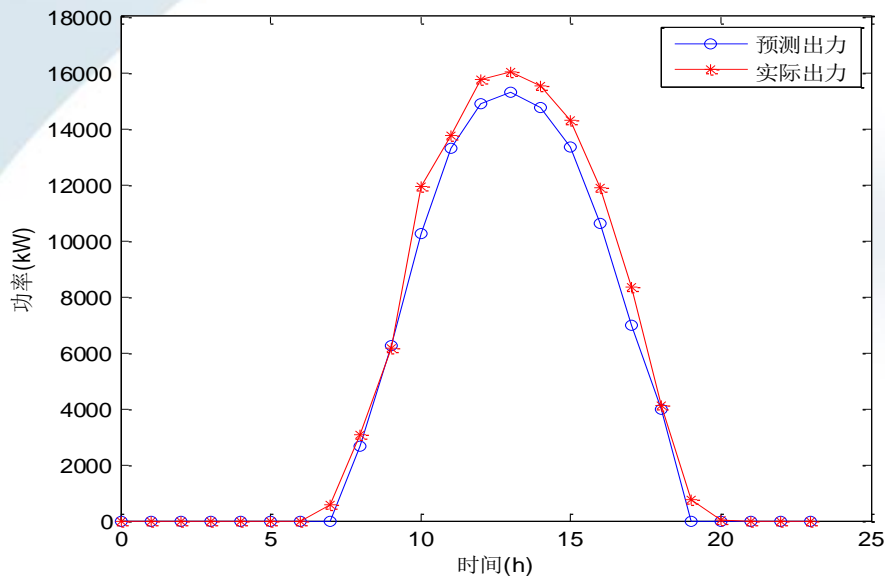
- ◆ 避免过拟合现象：避免网络权值“记忆”而非“学习”了样本的映射规律；
- ◆ 避免网络权值受到样本中的随机误差（如噪声）的影响，而导致泛化能力减弱的现象。



# 训练样本的选取与分析

- 原始训练样本进行归一化处理(Normalization)
  - 否则，各个参数的单位不一致
  - 且各个数据差异较大，容易引起神经元饱和
- 天气类型参数细化分类训练的模型
- 最佳相似日选取方法
  - 前一日功率法
  - 欧氏距离法
  - 聚类分析法（误差较小）

# 甘肃民勤红沙岗光伏电站日前出力预测算例



- 平均相对误差为 $MAPE=7.65\%$ ;
- 相对误差可以发现预测误差相对较大的时刻是早晨和傍晚, 略高10%;
- 出力较大的时段误差较小, 低于5%;
- 功率绝对误差乘以对应时间段, 折算为电量, 对电量平衡的影响小;
- 样本数据仅为1个半月, 如获取更多的历史运行数据, 预测效果将更好。

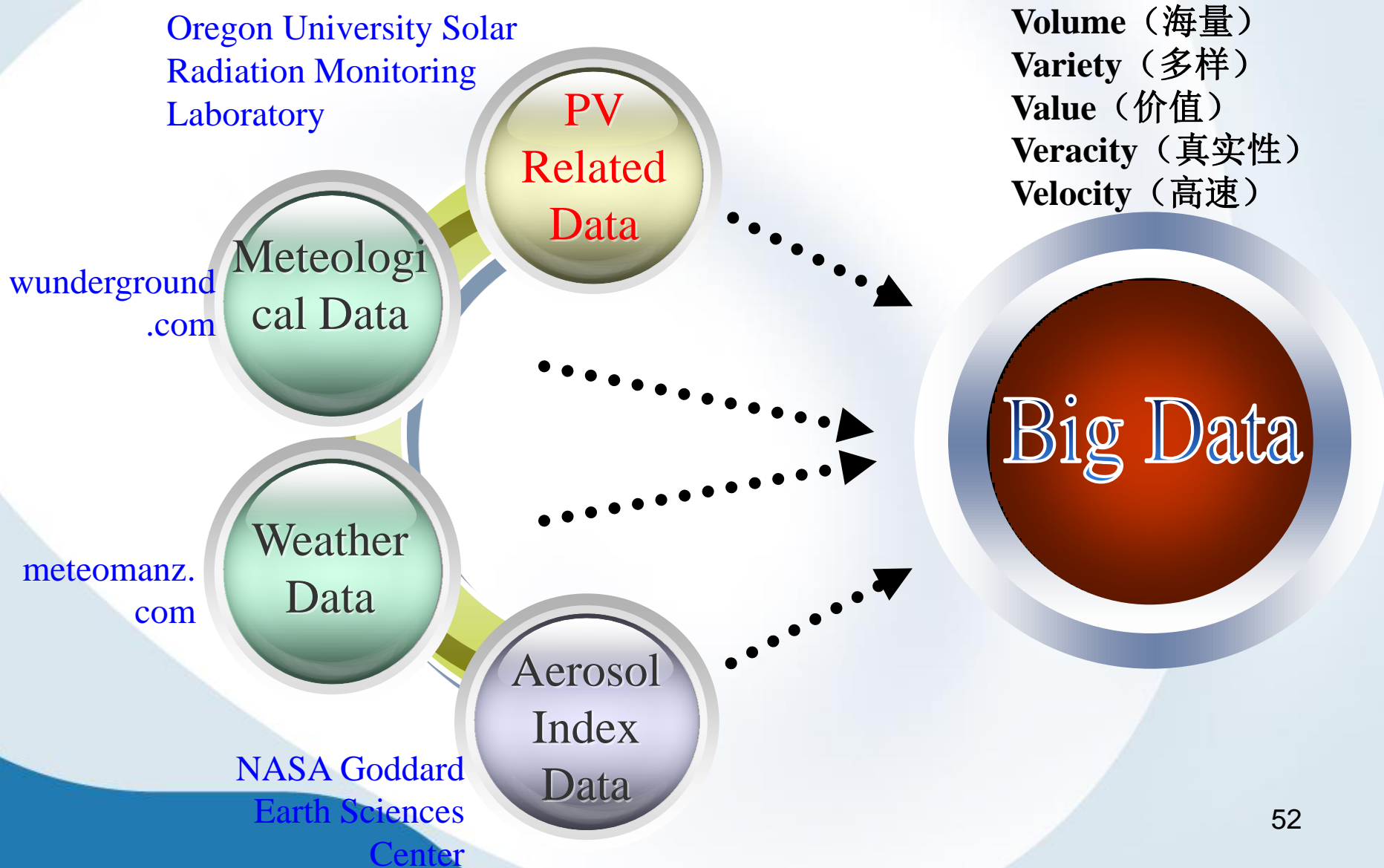
## 多来源 → 大数据

- 其它可获取的参数如：**气溶胶指数AI**
  - **AI定义**：一个反映空气中**灰尘或烟尘颗粒物对太阳辐射吸收程度的指数**，通常采用如**360nm与331nm之间辐射通量的比值**来表征。
  - 美国**NASA**的**TOMS & OMI AI数据定义**：

$$AI = 100 \left[ \log_{10} \left( \frac{I_{360}}{I_{331}} \right)_{measured} - \log_{10} \left( \frac{I_{360}}{I_{331}} \right)_{calculated} \right]$$

- 通常，气溶胶指数参数的大小和光伏出力为负相关，即**AI越大，光伏发电的功率越小**。

# 多来源->大数据



## 多来源 → 大数据

- 天气类型参数--分类建模；
- 最高温度、最低温度、平均温度、最大湿度、最低湿度、平均湿度、平均风速、露点、降水指数等--气象参数；
- 气溶胶指数AI、PM2.5、PM10参数--气象参数；
- 云层图像的模式、类型参数--机器视觉、模式识别与分类；
- 云层厚度、云高、云移、投影面积等--实时测量。

