



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# Lecture 15

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

熟悉含新能源发电系统的可靠性计算方法和容量可信度指标。

## 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。

## 5.2 电力系统可靠性计算

### 一、电力系统可靠性概述

- **可靠性**（Reliability）是指一个元件、设备或系统在规定的**条件**下和规定的**时间**内完成规定**功能**的**概率**或**能力**。
- **可靠性评估**提供研究可靠性的**理论**和实用的**工具**，评价元件、设备或系统的可靠性性能，获得产品或系统的**最优可靠性**。

# 电力系统大规模故障的影响

- 1996年美国西部电力系统发生了两次特大的停电事故。
  - 一次发生在1996年7月2日，停电持续时间约0.5h，停电负荷达7.5GW，损失发电容量6.4GW，影响用户约200万个。
  - 另一次发生在1996年8月10日，停电时间约3h，损失负荷达30.498GW，损失发电容量25.578GW，影响用户约750万个，停电面积达180万平方英里，包括美国的14个州和加拿大的两个省。



受停电影响的人口约5000万，地域约24000平方公里，停电持续时间为29小时，损失负荷61800兆瓦

美加8.14大停电后的纽约



为什么现代电网的设计运行技术取得了很大的发展，但是仍不能完全避免大电网的崩溃事故发生？

# 电力系统可靠性

- 电力系统可靠性是可靠性理论在电力系统中的应用。
  - 电力系统可靠性是指电力系统按可接受的**质量**标准和所需**数量**不间断地向电力用户供应电力和电能的能力。
  - 电力系统可靠性包括**充裕度**和**安全性**两个方面：
    - 充裕度是在**静态**条件下电力系统满足用户电力和电能的能力。
    - 安全性是在**动态**条件下电力系统经受住突然扰动并不间断地向用户提供电力和电能的能力。

电力系统可靠性包括哪些方面？

- ☐ A 稳定性
- ☒ B 安全性
- ☐ C 灵活性
- ☒ D 充裕性

提交



# 电力系统可靠性包含的内容

## 第一层

发电系统可靠性评估

输电系统可靠性评估

## 第二层 发输电系统可靠性评估

发电厂变电所电气  
主接线可靠性评估

配电系统可靠性评估

## 第三层 电力系统可靠性



# 可靠性指标

- |             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| 1. 概率型:     | 可靠性或可用性                             |
| 2. 频率型:     | 单位时间内故障次数                           |
| 3. 平均持续时间型: | 首次故障的平均时间<br>故障间平均持续时间<br>故障的平均持续时间 |
| 4. 期望值型:    | 一年故障天数的期望值                          |

# 可靠性研究的模型及算法

## ➤ 可靠性研究模型

1. 解析模型：根据元件与系统之间的关系，用公式显示表示可靠性指标。
2. 蒙特卡洛模型：对元件的失效事件进行抽样，再通过概率统计的方法得到可靠性指标。

## ➤ 可靠性评估算法

1. 基本解析法：故障模式后果分析法、最小路径法、网络等值法、故障扩散法、向量法、GO法等
2. 蒙特卡洛模拟法

# 可靠性与电力系统规划

发电系统—— 单节点—— 电源规划

输电系统—— 发电机组无故障—— 输电规划

配电系统—— 枢纽变电源可靠—— 配电规划

# 提高电力系统可靠性的措施

## 1.采用高质量元件

## 2.增加备用冗余度

- ✘ 增加发电机容量
- ✘ 增加电网容量
- ✘ 增加变电站变压器容量

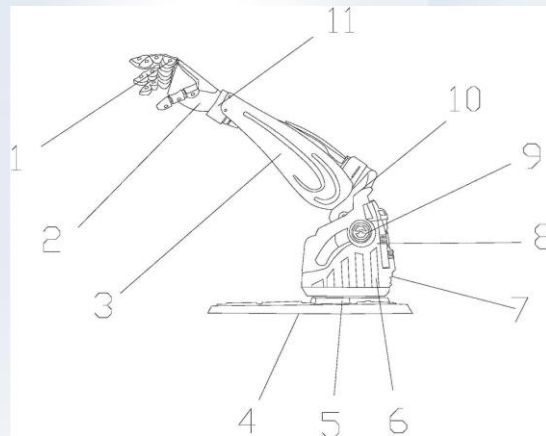
## 3.合理规划设计（网络结构，主接线结构）

## 二、系统可靠性基础理论

- 系统可靠性基本术语

### 系统 (System)

一个系统是由一组零件（元件）、部件、子系统或装配件（统称为单元）构成的、完成期望的功能、并具有可接受的性能和可靠性水平的一种特定设计。



# 元件

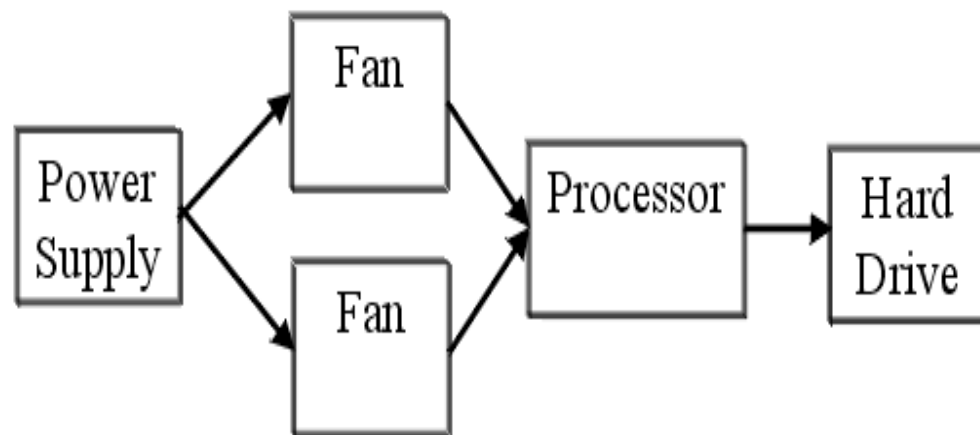
- **元件**：在可靠性统计、检验和分析中不需要再细分的部件或部件组合。元件应有独立的功能。
- 元件分为**有效**和**失效**两状态。
- 元件的故障模型的建立是以寿命试验和故障率数据为基础的。

# 可靠性方块图

(RBDs—Reliability Block Diagrams)

## 可靠性方块图

是系统元件及其**可靠性意义下连接关系的图形表达**，表示元件的正常或失效状态对系统状态的影响。在一些情况下，它不同于结构连接图。



计算机的简化可靠性方块图

- 一个方块可以代表**零件（元件）、部件、子系统或装配件**。
- 系统可靠性评估的第一步是**获取数据**（寿命或成功次数等），估计单元的可靠性水平。



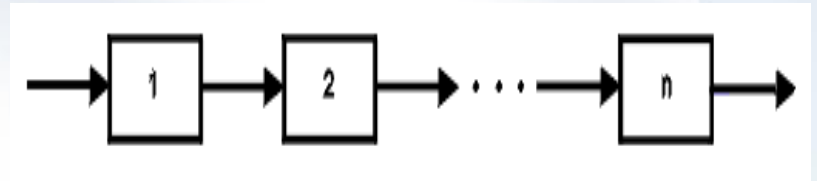
# 系统可靠性连接形式

- (1) 串联系统
- (2) 并联系统
- (3)  $k/n$ 表决系统
- (4) 串并联混合系统
- (5) 复杂系统

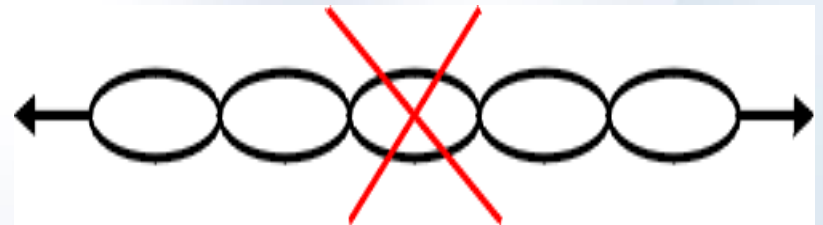
## (1) 串联系统

- 系统可靠度为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i$$



- 可靠性串联系统中，可靠性最差的单元对系统的可靠性影响最大。



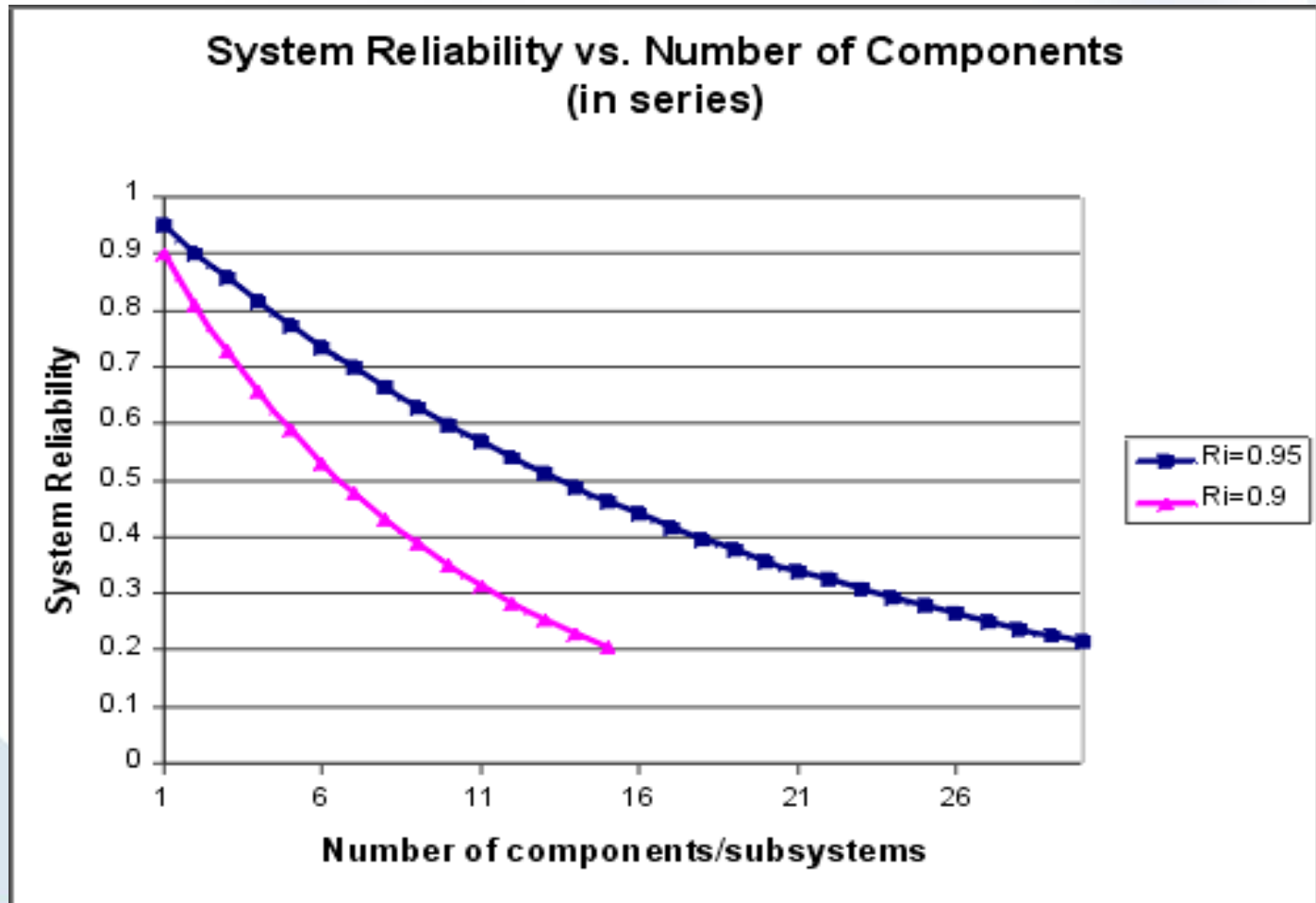
- [例 1] 设计某一串联系统需要200个相同的元件。如果要求系统整体可靠性不小于0.99，则每个元件可靠度的最低值应该是多少？

解： 按题意可知， $0.99 = R^{200}$  即

$$R = 0.99^{1/200} = 0.9995$$

即要求每个元件的可靠度至少达到0.9995。

对系统可靠性的认识**误区**：在特定的时间内，已知系统所有单元的可靠度为90%，则系统可靠度为90%。



## (2) 并联系统

当系统中任一元件运行，系统即能完成规定的功能，则称这种系统为并联系统。由代表元件的框全部并联构成的网络即为原系统并联等效的可靠性框图。考察由两个独立元件**A**和**B**构成的并联系统，如图所示。这也就意味着必须两个元件都失效系统才失效。

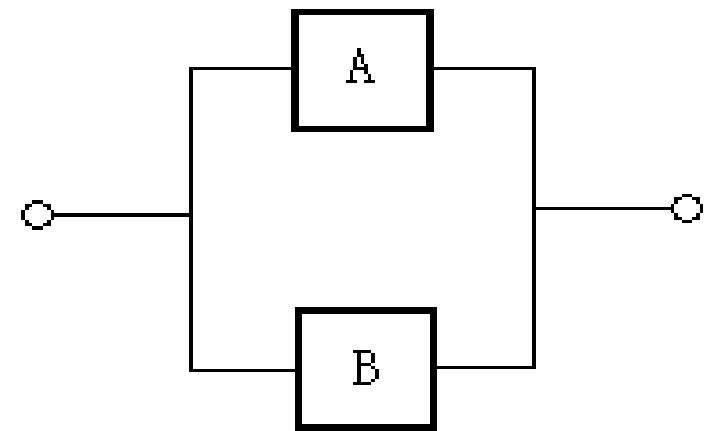


图 2-23 两元件并联系统

此时，系统可靠度可由系统不可靠度的补数求得，即

$$R_P = 1 - Q_A Q_B$$

或

$$R_P = R_A + R_B - R_A R_B$$

对于 $n$ 个元件的并联系统则有

$$R_P = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i$$

$$Q_P = \prod_{i=1}^n Q_i$$

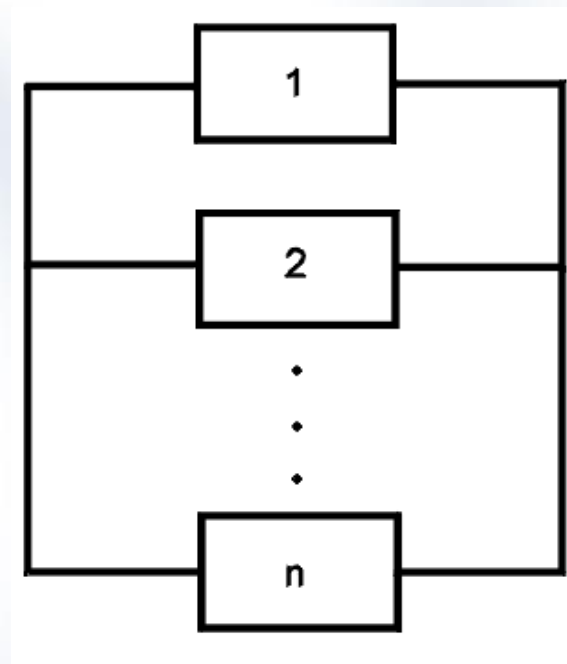
由此可知串联系统可靠度随着系统元件个数的增多而下降；并联系统则是不可靠度随着系统元件个数的增多而下降，即系统可靠度随构成元件数的增多而提高。

## 并联系统的可靠度计算

- 系统可靠度为

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

冗余最大。



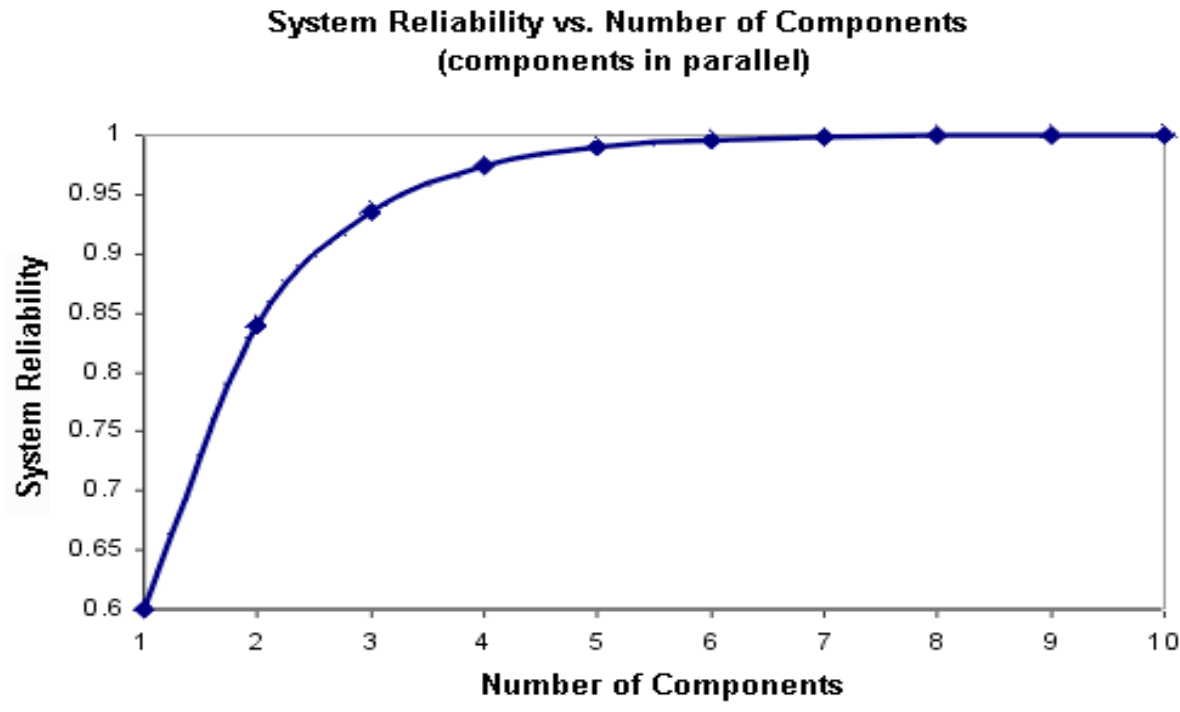
可靠性并联系统



## 并联系统的可靠性

但增加并联元件个数会增加系统初投资，质量和体积，并增加所需要的维修量。所以，必须审慎的权衡得失。

Component 1	Component 2	Component 3	System Reliability
0.6	0.7	0.8	0.976
0.7	0.7	0.8	0.982
0.6	0.8	0.8	0.984
0.6	0.7	0.9	0.988



[例 2] 某系统有四个元件并联组成，其可靠度分别为0.99,0.95,0.98,0.97。问系统的可靠度和不可靠度分别是多少？

解：系统不可靠度为

$$Q_p = (1-0.99)(1-0.95)(1-0.98)(1-0.97) = 3 \times 10^{-7}$$

则可靠度为

$$R_p = 0.9999997$$

### (3) $k/n$ 表决系统

- 特例：  $1/n$ —串联系统
- $n/n$ —并联系统
- 系统可靠度：（ $n$ 个元件中有 $r$ 个元件运行的概率）：

$$P_r = \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r (1-p)^{n-r}$$

## [例3]

- 系统1—— $24 \times 10\text{MW} = 240\text{MW}$   $q=0.01$
- 系统3—— $12 \times 20\text{MW} = 240\text{MW}$   $q=0.03$
- 负荷200MW，备用率20%。
- 系统1失负荷概率： 多于5台机故障的概率之和  
0.0000035。  
其中 
$$P_r = \frac{24!}{5!(24-5)!} 0.01^5 (1-0.01)^{24-5} = 0.0000035$$
- 系统3失负荷概率： 多于3台机故障的概率之和  
0.0045。
- 其中 
$$P_r = \frac{12!}{3!(12-3)!} 0.03^3 (1-0.03)^{12-3} = 0.004516$$
- 备用相同，概率风险度差1200倍。

## (4) 串—并联系统

上两节中所讨论的串联和并联系统是分析更复杂系统的基础。

一般原则是把复杂系统可靠性模型中相应的串，并联支路归并起来从而使系统逐步得到简化，直到简化为一个等效元件。

这个等效元件的参数也就代表了原始网络的可靠度（或不可靠度）。这种方法通常称为网络简化法。

## [例 4]

对图示系统，如果所有元件的可靠度均为0.8，计算系统的不可靠度。

**解：** 本例题的逻辑步骤是：将元件3，4归并为等效元件6，将元件1,2和等效元件6归并为等效元件7，最后合并元件5和等效元件7得到等效元件8。

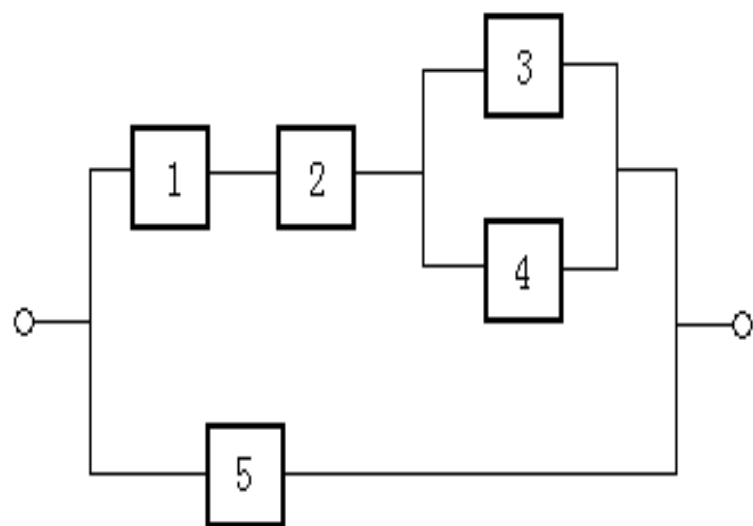


图 2-24 [例 2-27]的可靠性框图

等效元件8的参数就代表了系统的可靠性。下图  
示出简化步骤：

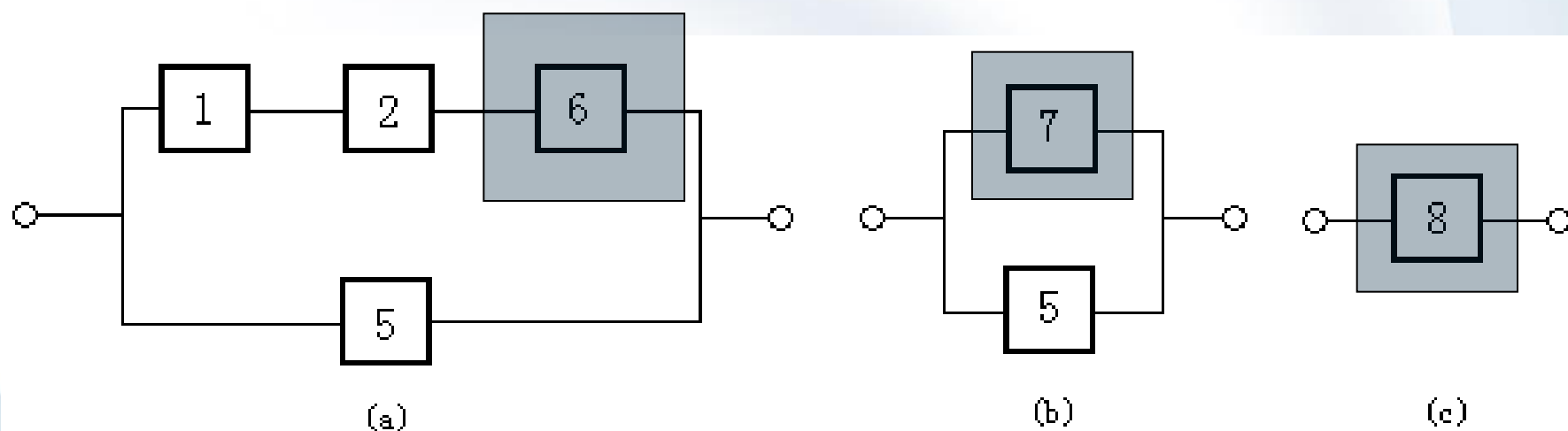


图 2-25 [例 2-27]的简化过程

(a) 第一次简化；

(b) 第二次简化；

(c) 第三次简化



- 如果  $R_1, \dots, R_5$  和  $Q_1, \dots, Q_5$  分别代表元件 1, ..., 5 的可靠度和不可靠度, 则有

$$Q_6 = Q_3 Q_4$$

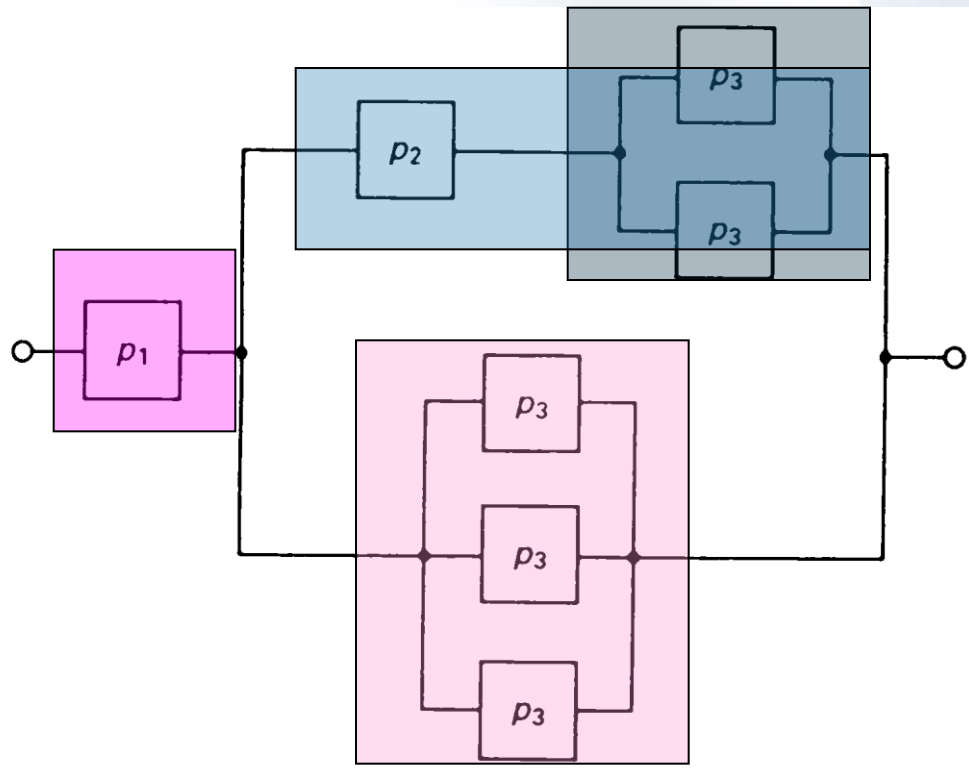
$$Q_7 = 1 - (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_6)$$

$$= Q_1 + Q_2 + Q_6 - Q_1 Q_2 - Q_2 Q_6 - Q_6 Q_1 + Q_1 Q_2 Q_6$$

$$Q_8 = Q_5 Q_7 = Q_5 (Q_1 + Q_2 + Q_3 Q_4 - Q_1 Q_2 - Q_2 Q_3 Q_4 - Q_3 Q_4 Q_1 + Q_1 Q_2 Q_3 Q_4)$$

- 由已知数据,  $R=0.8$ , 因此  $Q_i = 0.2$  ,  
且  $Q_8 = 0.07712$  。

[例5]



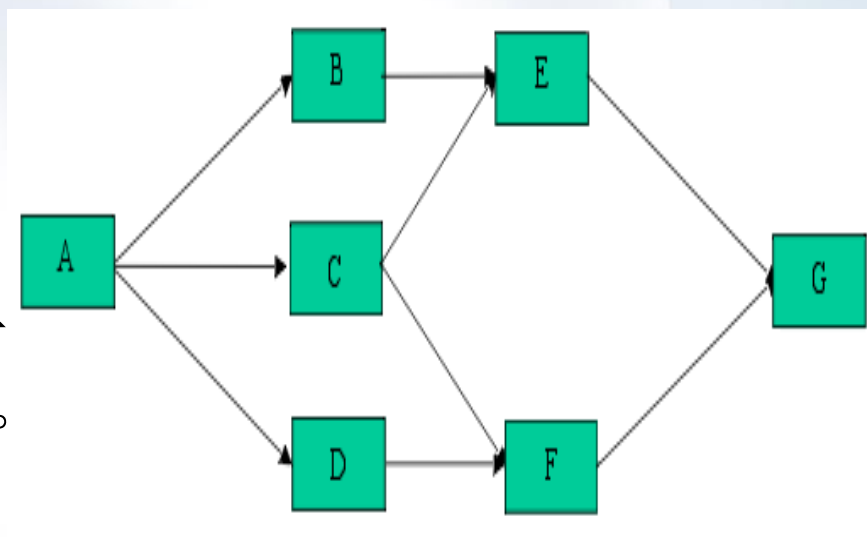
$$R_s = p_1 \cdot \left[ 1 - (1 - p_3)^3 \left( 1 - p_2 (1 - (1 - p_3)^2) \right) \right]$$

## (5) 复杂系统

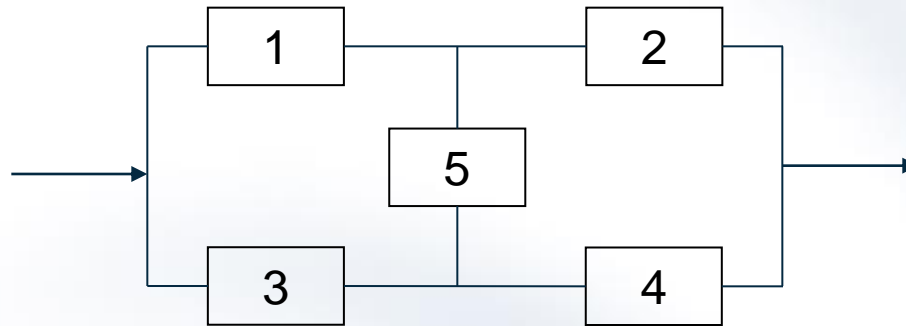
非串/并联结构（简称复杂结构）系统是如图所示的网络。

直观上，图中系统没有简单的串/并联部分。有多种分析这类网络的有效方法。

- 分析方法：
  1. 分解分析方法：选择关键单元，先分解系统，再组合计算。
  2. 状态空间法
  3. 最小路径法
  4. 最小割集法



可靠性复杂系统模型示例图



桥系统

- 最小路径：
  - 任一最小路径中的部件失效，即不成为路径。
  - 12, 34, 154, 352
- 最小割集：
  - 任一最小割集中的部件失效，即使得系统失效。
  - 13, 24, 154, 352

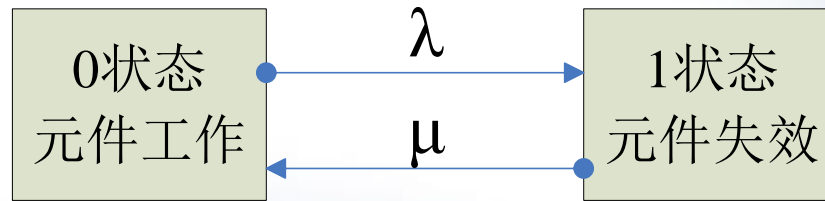
### 三、可修复系统的可靠性

对于可修复系统，须同时考虑可靠性和维修性。类似于基于寿命数据的可靠性建模方法，可以处理修复数据获得维修性特征量，如：维修度、修复率、平均修复时间等。可用性综合考虑可靠性和维修性。

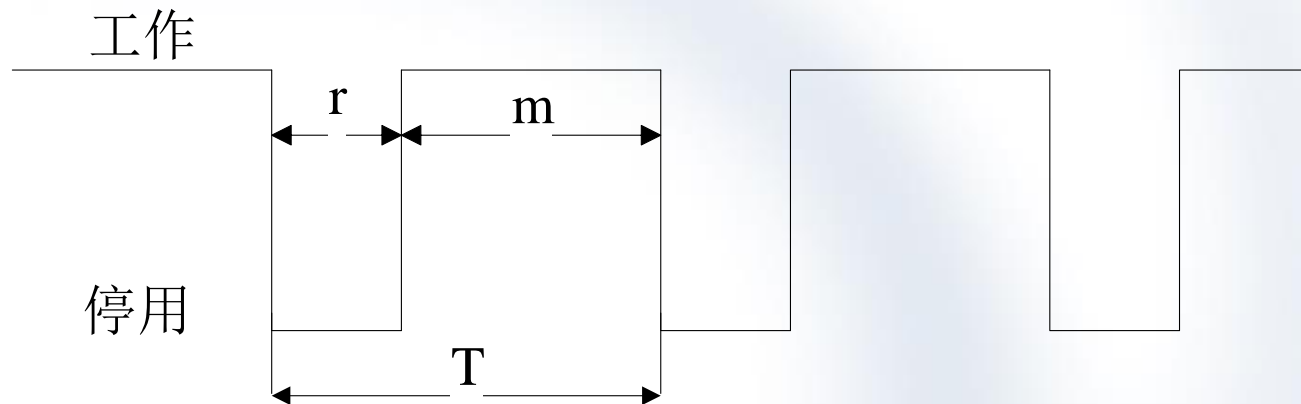
# 元件基本结构的可靠性

## ——状态空间/时间法

- 以下的讨论假设电力系统中元件的失效和修复特性均服从指数分布，即它们的故障率 $\lambda$ 和修复率 $\mu$ 都是常数。下图所示的单元件系统状态空间图和状态时间图，给出以下定义：



(a)



(b)

图2-31 单元件系统状态图  
(a) 状态空间图; (b) 状态时间图



$$\text{元件故障率}\lambda = \frac{\text{给定期间内元件的故障次数}}{\text{元件运行的总时间}}$$

$$\text{元件修复率}\mu = \frac{\text{给定期间内元件的修复次数}}{\text{元件进行维修的总时间}}$$

- 综合表达为：

$$\text{转移率} = \frac{\text{从一个给定状态发生转移的次数}}{\text{该状态存在的总时间}}$$

- 设该元件的平均无故障持续时间为 $m$ ；平均修复时间为 $r$ ；平均失效间隔时间，即循环的周期为 $T$ ；循环频率为 $f$ 。则根据指数分布假设可得

$$m = MTTF = 1 / \lambda$$

$$r = MTTR = 1 / \mu$$

$$T = MTBF = m + r = 1 / f$$

式中：MTTF（mean time to failure）为平均无故障持续工作时间；MTTR（mean time to repair）为平均修复时间；MTBF（mean time between failures）为平均失效间隔时间。

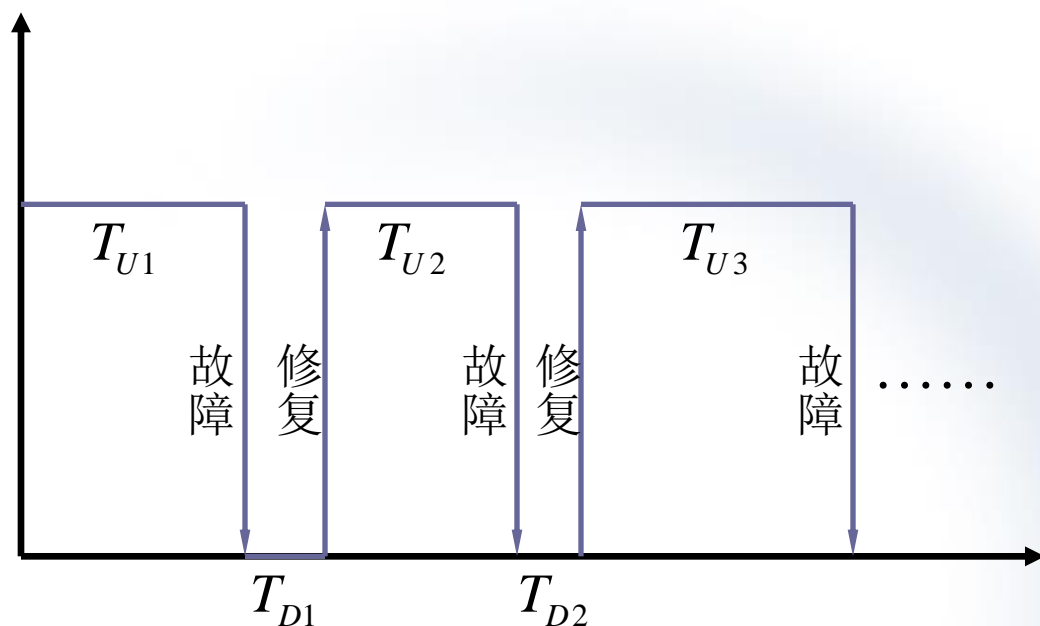
## 四、发电系统可靠性分析

特点：并联系统  
考虑容量  
时间周期

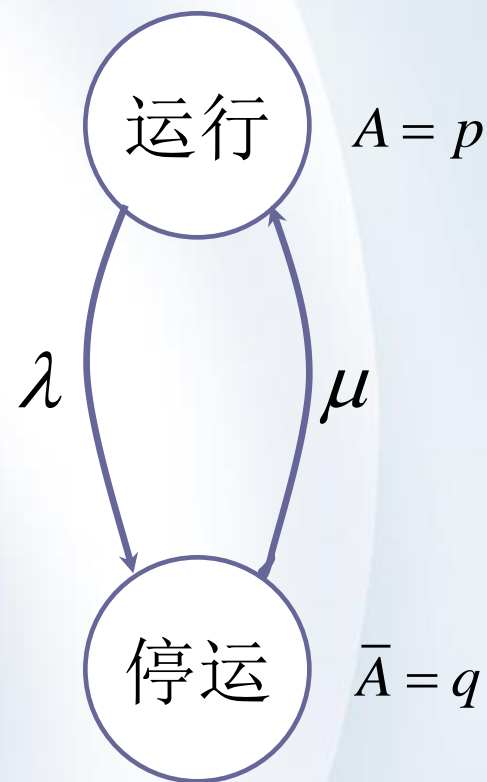
### 发电系统可靠性分析内容：

- 发电机可靠性数据统计方法
- 理论基础和分析方法
- 实际工程应用需要考虑的问题

# 单台发电机组的可靠性模型



(a)



(b)

发电机组的寿命过程及状态图

(a)寿命过程；(b)状态图

# 发电机组的可靠性模型

- 平均无故障工作时间:

$$MTTF = \sum_{i=1}^n T_{Ui} / n$$

故障率:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

- 平均修复时间:

$$MTTR = \sum_{i=1}^n T_{Di} / n$$

修复率:

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

- 平均故障间隔时间:  $MTBF = MTTF + MTTR$
- 运行状态概率（有效度）:

$$A = \frac{MTTF}{MTBF} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

## 发电机可靠性数据统计

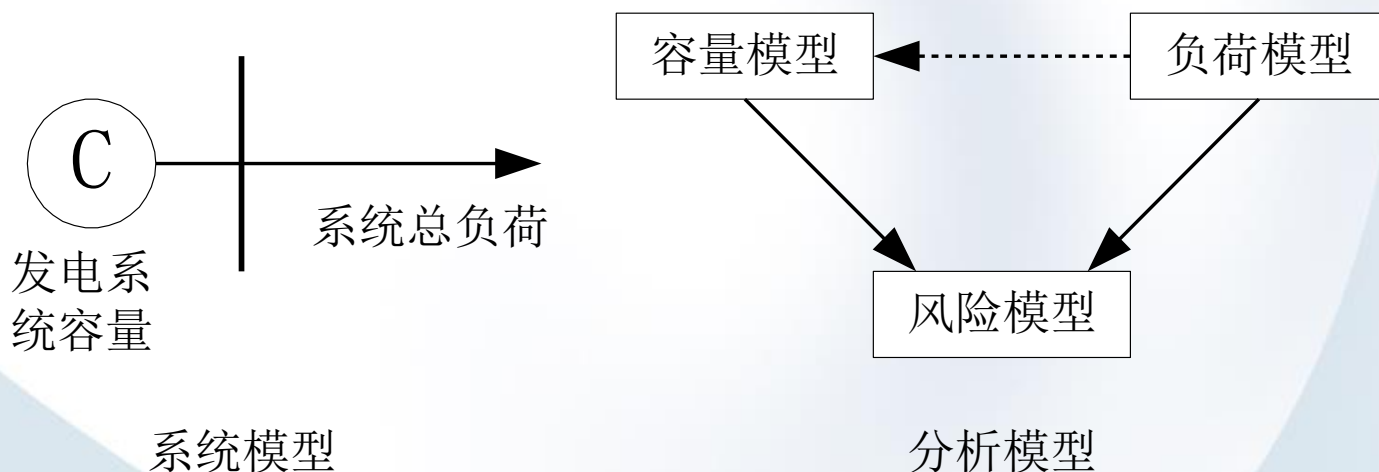
- 发电机的可靠性数据是通过实际运行数据统计获得的。
- 为了获得足够大的样本数，一般对较多的发电机（全国的）/较长的时间（5年）的运行数据进行统计。
- 对发电系统可靠性评估主要需要的是发电机的强迫停运率FOR。

## 100MW及以上容量火力发电机组五年平均可靠性指标

机组容量 (MW)	累计台年 数	运行小时 SH (小时)	强迫停运F0		强迫停 运率 FOR (%)	降出力等 效小时 (EDH)	等效强迫 停运率 EFOR (%)	故障率 (次 /台年)	修复率 (次 /台年)
			次数 (FOT)	小时数 (FOH)					
100	666.49	6468.76	1.3	62.67	0.96	8.58	1.09	1.760	181.71
125	647.27	6663.95	1.87	73.32	1.09	17.93	1.35	2.458	223.42
200	863.44	6611.39	2.26	112.17	1.67	20.19	1.96	2.994	176.50
210	49.81	6253.24	0.96	63.12	1.00	4.2	1.07	1.345	133.23
250	10.01	8073.16	0.7	31.08	0.38	1.63	0.40	0.760	197.30
300	736.89	6374.21	3.78	145.7	2.23	23.27	2.58	5.195	227.27
320	20.01	3818.64	1	15.29	0.40	0.85	0.42	2.294	572.92
330	44.19	6184.71	6.74	396.22	6.02	14.25	6.22	9.547	149.01
350	119.59	7057.32	3.43	107.58	1.50	15.5	1.71	4.258	279.30
500	24.02	6572.37	3.37	351.31	5.07	32.76	5.52	4.492	84.03
600	69	6785.99	5.3	265.12	3.76	24.53	4.09	6.842	175.12
660	16.01	6859.92	12.99	942.86	12.08	300.5	15.34	16.588	120.69
700	1.75	7439.12	6.3	489.54	6.17	242.2	8.96	7.419	112.73
800	2.33	5497.56	6.43	483.92	8.09	18.56	8.37	10.246	116.40

# 发电系统可靠性分析方法

- 发电系统可靠性主要考虑发电系统的可用容量是否能满足负荷的需要。
- 为了突出矛盾，假定发电机和负荷之间的输电系统是完全可靠的，电源发出的电能可以无损失地到达负荷。





- **停运容量模型**是系统发电机停运容量的概率分布模型，根据每台发电机的额定容量和强迫停运率建立。
- **负荷模型**是系统需要满足的负荷的统计模型，一般根据实际系统数据统计或负荷预测获得。
- **风险模型**是评估发电系统可用容量大于负荷需求的概率。

# 发电系统可靠性风险模型和指标

- 电力不足概率**LOLP**，也称为失负荷概率。是指发电系统可用容量不能满足系统年最大负荷需求的**概率**。
- 电力不足期望值**LOLE**。LOLE是在假定系统日峰荷持续一天不变的条件下求得的，规定的标准判据在0.1~5d/a之间：

$$LOLE(\text{年}) = \sum_{j=1}^{365} P\{((C_s - X) - L_j) < 0\} \text{天/年}$$

- 小时电力不足期望值**HLOLE**。规定的标准判据在2.4~60h/a之间：

$$HLOLE(\text{年}) = \sum_{j=1}^{365} \sum_{k=1}^{24} P\{((C_s - X) - L_{j,k}) < 0\} \text{小时/年}$$

- 电量不足期望值**EENS**：

$$EENS(1\text{h}) = \sum_{X=C_s-L+1}^{C_s} (L - (C_s - X)) p(X) \text{ MWh}$$

## 【例6】

- 例6：某发电系统有三台机组，总装机容量为450MW，容量(MW)和强迫停运率分别为：100，0.01；150，0.02；200，0.03。假定某一小时的负荷为340MW，计算系统损失负荷电力的概率和损失的负荷电量。

状态	可用容量	停运容量	状态概率	积累概率
无	450	0	0.941094	1
1停运	350	100	0.009506	0.058906
2停运	300	150	0.019206	0.0494
3停运	250	200	0.029106	0.030194
1、2停运	200	250	0.000194	0.001088
1、3停运	150	300	0.000294	0.000894
2、3停运	100	350	0.000594	0.0006
1、2、3停运	0	450	0.000006	0.000006

<340MW

$$\text{LOLP} = 0.019206 + 0.029106 + 0.000194 + 0.000294 + 0.000594 + 0.000006$$

$$= 0.0494$$

$$\begin{aligned} \text{EENS} &= (150-110) \times 0.019206 + (200-110) \times 0.029106 + \\ &\quad (250-110) \times 0.000194 + (300-110) \times 0.000294 + \\ &\quad (350-110) \times 0.000594 + (450-110) \times 0.000006 \\ &= 3.6154 \text{ MWh} \end{aligned}$$

## 问 题

1. 状态数为 $2^N$ ，当发电机数量 $N$ 很多时，计算量太大。
  2. 发电机数量增加，重复状态增多。
- **解决办法**——采用递推公式建立停运容量概率模型。

## 五、配电系统可靠性

特点：通常为可修复串联系统；  
考虑开关操作、熔断器动作等。

# ( 1 ) 负荷点的可靠性指标

指标名称	公式	说明
年故障停运率 $\lambda$ (次/年)	$\lambda_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \quad (m \text{ 为元件数})$	指负荷点在一年中因电网元件的故障造成停电的次数
年平均停运时间 <b>U</b> (小时/年)	$U_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} * r_{ij}$	指负荷点一年内停电的时间总数
平均停运持续时间 <b>r</b> (小时/次)	$r_i = \frac{U_i}{\lambda_i}$	指负荷点从停电开始到恢复供电这段时间的平均值
年电量不足期望 <b>EENS</b> (千度/年)	$EENS_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} * L_i * r_{ij}$	负荷点在一年中因停电而造成的此节点上用户的电量损失
年停电损失费用 <b>ECOST</b> (万元/年)	$ECOST_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} * f(r_{ij}, type) * L_i$	负荷点在一年中因停电而造成的此节点上用户的经济损失
年停运能量评估 <b>IEAR</b> (万元/千度)	$IEAR_i = \frac{ECOST_i}{EENS_i}$	衡量此负荷点单位电量损失所带来经济损失

## ( 2 ) 系统的可靠性指标

指标名称	公式	说明
系统平均停电频率 <b>SAIFI</b> (次/用户.年)	$SAIFI = \sum_{i=1}^n \lambda_i * N_i / \sum_{i=1}^n N_i$	指每个由系统供电的用户在单位时间内平均停电时间
系统平均停电持续时间 <b>SDIAI</b> (小时/用户.年)	$SAIDI = \sum_{i=1}^n U_i * N_i / \sum_{i=1}^n N_i$	指每个由系统供电的用户在单位时间经受的平均停电持续时间
用户平均停电时间 <b>CAIDI</b> (小时/用户.年)	$CAIDI = \sum_{i=1}^n U_i * N_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i * N_i$	指单位时间内每个受停电影响的用户在每次停电所持续的时间
平均供电可用率 <b>ASAI</b>	$ASAI = (\sum_{i=1}^n N_i \times 8760 - \sum_{i=1}^n N_i * U_i) / \sum_{i=1}^n N_i \times 8760$	指一年中用户的用电小时数与用户要求的总供电小时数之比
年电量不足期望值 <b>EENS</b> (兆瓦时/年)	$EENS = \sum_{i=1}^n EENS_i$	系统中所有负荷点因停电事故造成的电量损失之和
年停电损失费用 <b>ECOST</b> (万元/年)	$ECOST = \sum_{i=1}^n ECOST_i$	系统中所有负荷点因停电事故造成的经济损失之和
年停运能量评 <b>IEAR</b> (万元/兆瓦时)	$IEAR = \frac{ECOST}{EENS}$	衡量整个系统单位电量损失带来的经济损失



### ( 3 ) 评估算法

- 元件的可靠性参数为：
  - 平均故障率 （次/年）
  - 平均停运时间 （小时/次）
  - 平均年停运时间 （小时/年）
- 串联公式：

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i$$

$$U_s = \sum_i \lambda_i \cdot r_i$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\sum \lambda_i}$$

## 六、输电系统可靠性

特点：

- 结构复杂，规模大，环网较多
- 电压等级多
- 需考虑线路输送容量限制
- 需考虑节点电压约束
- 需考虑有功及电压的调节与控制

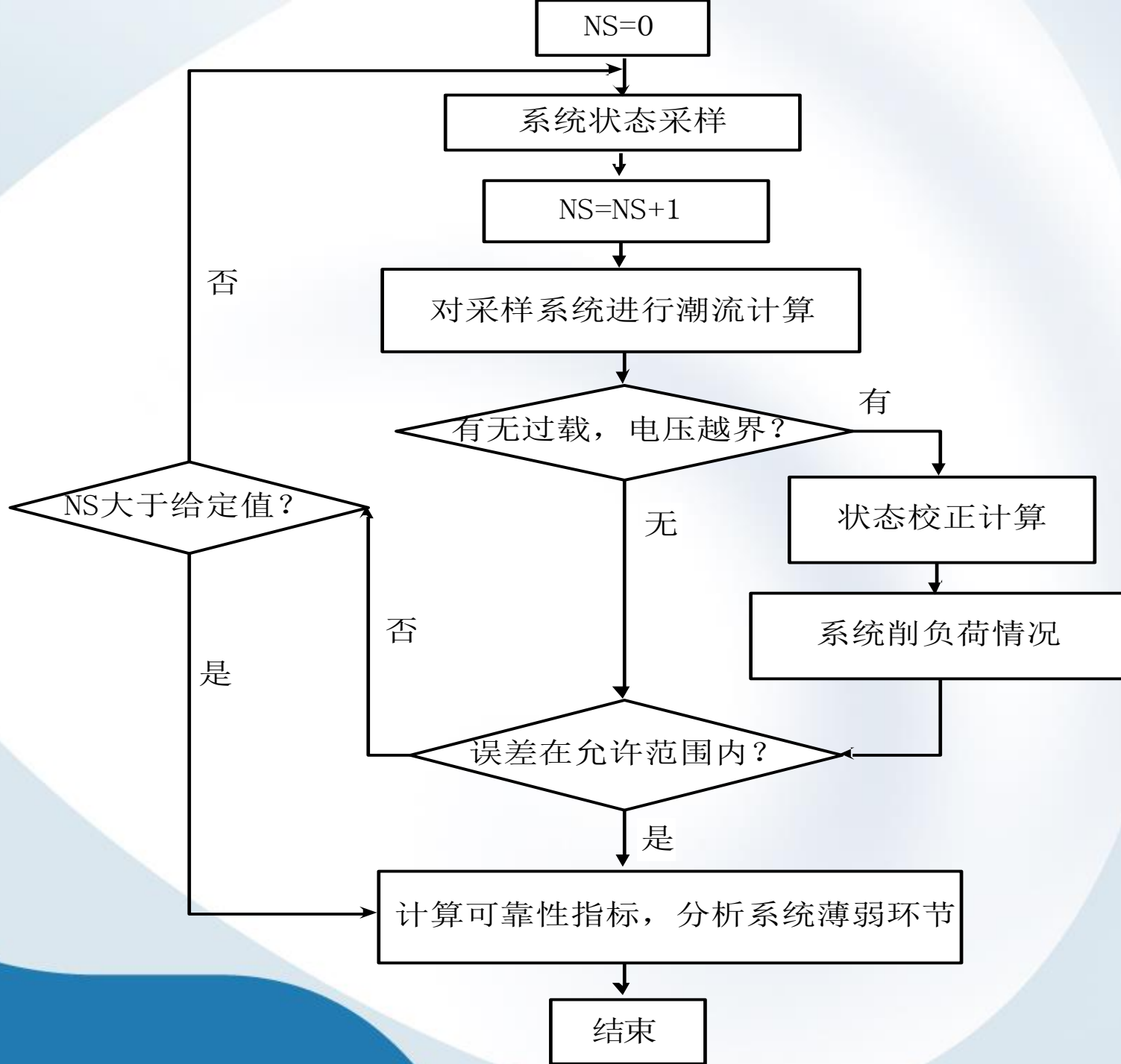
多采用蒙特卡洛法。

## 蒙特卡洛法的特点

- (1) 属于统计试验方法，比较直观；
- (2) 可发现一些人们难以预料事故；
- (3) 便于处理负荷的随机变化特性；
- (4) 容易处理各种实际运行控制策略；
- (5) 采样次数与系统的规模无关；
- (6) 易于处理系统按时间顺序进行的操作；
- (7) 计算时间相对较长。

# 蒙特卡洛模拟法的基本思路

- 系统状态采样
- 进行潮流计算
- 有无过载、电压越限，有则校正
- 统计削负荷情况
- 计算可靠性指标、分析系统薄弱环节



# 蒙特卡洛状态采样法

- 状态采样法（非时序蒙特卡洛法）
- 元件状态持续时间采样法（时序蒙特卡洛法）
- **Markov** 链采样法

基本采样方法：

输电元件的**FOR** VS 随机数（随机数发生器）

## 七、可靠性价值

可靠性价值最直接的体现就是系统可靠性改善所带来的停电损失减小。通过停电损失的计算即可将风险和经济因素放在统一的价值尺度上来衡量。

# 可靠性与经济性

