

附件

中国核电厂设备可靠性数据报告（2015版）

国家核安全局
二〇一五年七月

前言

为推动概率安全分析（PSA）技术在我国核安全领域中的应用，提高核电站安全水平和核安全监管效率，我局于 2010 年发布《概率安全分析技术在核安全领域中的应用》（试行），其中数据分析是 PSA 工作的重要基础，对确保我国核电站 PSA 模型以及相应分析结果的准确性和合理性具有重要意义。为此，我局于 2014 年 2 月发布《关于开展核电站设备可靠性数据采集工作的通知》，要求各核电站营运单位参照《核电站设备可靠性数据采集》（试行）开展核电站设备可靠性数据采集工作，并按要求定期报送数据。我局委托环境保护部核与辐射安全中心建立了中国核电站 PSA 设备可靠性数据库平台，并负责上报数据的处理及发布。

本文件中给出了我国在运核电站商运至 2013 年底，共 13 台机组、123 个堆年、36 个常用设备类的可靠性数据统计，以及 6 个安全重要系统列的不可用数据统计，并在此基础上，结合美国 NUREG/CR-6928（2007 年出版）通用数据源，采用适当的数据处理方法得到中国运行核电站 PSA 通用数据。

本文件可供国内核电行业在 PSA 分析或与可靠性相关工作中参考使用。

本文件由国家核安全局负责解释。

国家核安全局

2015年7月

1 设备可靠性数据

本章对我国在运核电机组商运至 2013 年底（包括大亚湾/岭澳一期/岭澳二期/秦山一厂/秦山二厂/田湾核电厂共 13 台机组，123 个堆年）的 36 个常用设备类的历史数据进行了统计（见表 1.1），并结合美国 NUREG/CR-6928 通用数据源，采用适当的参数估计方法进行可靠性估计，最终形成包括 36 个设备类不同失效模式的可靠性数据（见表 1.2）。

本章中设备可靠性数据的处理方法如下：

- (1) 对于失效次数大于等于 5 次的设备类，其可靠性参数采用经典估计方法中的最大似然估计方法进行处理。
- (2) 对于失效次数为 1-4 次且有先验数据的设备类，其可靠性参数按贝叶斯估计方法处理。
- (3) 对于失效次数为 0 次且有先验数据的设备类，其可靠性参数直接使用美国 NUREG/CR-6928 通用数据。
- (4) 对于失效次数小于 5 次且没有先验数据的设备类，其失效数据暂不进行估计，等失效次数积累足够多时再进行处理。

在本报告中，采用经典估计方法处理的参数的不确定性分布类型为对数正态（Lognormal，简称为 LN），采用贝叶斯更新的不确定性分布类型与先验数据保持一致。

本文件中主要涉及的术语及其定义如下：

不确定性

对构建的 PSA 中用到的参数值和模型的掌握情况所表示的可信度，一般根据不确定性的来源可分为随机不确定性和认知不确定性。

先验分布

在贝叶斯分析中，分析人员在得到抽样数据以前得出的某个变量具有的可信度的表达式。

表 1.1 设备可靠性数据统计表

序号	设备类	失效模式	失效次数 (次)	运行时间/ 需求次数
1	电动泵	FS:启动失效	19	94276 次
		FR:运转失效	33	9473777 小时
2	汽动泵	FS:启动失效	0	1589 次
		FR:运转失效	2	3139 小时
3	柴油机泵	FS:启动失效	0	299 次
		FR:运转失效	0	101 小时
4	电动阀	F0:拒开	32	63640 次
		FC:拒关	15	63640 次
		FA:运行中卡死	0	48416896 小时
		SA:误动作	0	48416896 小时
5	气动阀	F0:拒开	21	14329 次
		FC:拒关	7	14329 次
		FA:运行中卡死	4	25272076 小时
		SA:误动作	8	25272076 小时
6	电磁阀	F0:拒开	0	0
		FC:拒关	0	0
		FA:运行中卡死	0	0
		SA:误动作	0	0
7	先导式安全阀	F0:拒开	0	1933 次
		FC:拒关	0	1933 次
		SA:误动作	0	5560053 小时
8	弹簧加载式安全阀	F0:拒开	0	948 次
		FP:卡开	0	948 次
		SA:误动作	0	11870095 小时
		FL:过水卡开	0	0

序号	设备类	失效模式	失效次数 (次)	运行时间/ 需求次数
9	逆止阀	F0:拒开	2	103530 次
		FC:拒关	3	103530 次
10	手动阀	F0:拒开	1	31329 次
		FC:拒关	2	31329 次
11	应急柴油发电机组	FS:启动失效	25	3909 次
		FR:运转失效	5	4838 小时
12	其他柴油发电机组	FS:启动失效	0	669 次
		FR:运转失效	0	466 小时
13	小汽轮发电机组	FS:启动失效	9	953 次
		FR:运转失效	3	2287 小时
14	控制棒驱动机构电源 系统电动发电机组	FR:运转失效	3	973933 小时
15	电路断路器	F0:拒开	3	76917 次
		FC:拒关	13	111428 次
		SA:误动作	6	220070278 小时
16	停堆断路器	F0:拒开	2	13819 次
17	母线	FW:运行失效	0	21163521 小时
18	蓄电池组	FW:运行失效	0	7488661 小时
19	电池充电器	FW:运行失效	14	8094385 小时
20	逆变器	FW:运行失效	4	5210177 小时
21	继电器	FW:运行失效	0	1253568 小时
22	过滤器	GP:堵塞	28	12133572 小时
23	旋转滤网	GP:堵塞	0	2520736 小时
24	地坑滤网	GP:堵塞	0	2232236 小时
25	孔板	GP:堵塞	0	15086172 小时
26	板式热交换器	GP:堵塞	0	2076454 小时

序号	设备类	失效模式	失效次数 (次)	运行时间/ 需求次数
	板式热交换器	IL:内漏	6	4131795 小时
		EL:外漏	3	4131795 小时
27	管式热交换器	GP:堵塞	0	5187872 小时
		IL:内漏	4	7671161 小时
		EL:外漏	4	7671161 小时
28	水箱	EP:外漏 (承压)	0	6734423 小时
		EN:外漏 (常压)	0	4444987 小时
29	储气罐	FF:功能丧失	1	12095226 小时
30	变压器	FW:运行失效	14	16161612 小时
31	传感器/变送器	FW:运行失效	237	168771988 小时
32	风机	FS:启动失效	5	30738 次
		FR:运转失效	13	6996682 小时
33	冷冻机组	FS:启动失效	4	1492 次
		FR:运转失效	1	913046 小时
34	空气压缩机组	FS:启动失效	4	6897 次
		FR:运转失效	6	575600 小时
35	空气干燥器	FF:功能丧失	27	780232 小时
36	控制棒及驱动机构	FF:功能丧失	2	7379 次*束

表 1.2 设备可靠性参数表

序号	设备类	失效模式	5%置信下限	均值	95%置信上限	误差因子	后验分布			数据来源 ⁽¹⁾
							分布类型 ⁽²⁾	α/ξ	β/m	
1	电动泵	FS:启动失效	1.29E-04	2.02E-04	2.96E-04	1.51	LN			D
		FR:运转失效	2.52E-06	3.48E-06	4.66E-06	1.36	LN			D
2	汽动泵	FS:启动失效	9.01E-06	6.88E-03	2.82E-02	55.95	Beta	0.41	5.97E+01	M
		FR:运转失效	9.44E-05	3.19E-04	6.53E-04	2.63	Gamma	3.30	1.03E+04	B
3	柴油机泵	FS:启动失效	4.17E-07	3.88E-03	1.77E-02	206.02	Beta	0.30	7.73E+01	M
		FR:运转失效	1.29E-06	1.57E-04	5.64E-04	20.91	Gamma	0.58	3.73E+03	M
4	电动阀	F0:拒开	3.61E-04	5.03E-04	6.75E-04	1.37	LN			D
		FC:拒关	1.41E-04	2.36E-04	3.63E-04	1.60	LN			D
		FA:运行中卡死	3.21E-10	3.00E-06	1.37E-05	206.59	Gamma	0.30	1.00E+05	M
		SA:误动作	1.75E-10	4.45E-08	1.71E-07	31.26	Gamma	0.50	1.12E+07	M
5	气动阀	F0:拒开	9.61E-04	1.47E-03	2.11E-03	1.48	LN			D
		FC:拒关	2.14E-04	4.89E-04	9.18E-04	2.07	LN			D
		FA:运行中卡死	6.08E-08	1.69E-07	3.22E-07	2.30	Gamma	4.30	2.54E+07	B
		SA:误动作	1.48E-07	3.17E-07	5.71E-07	1.96	LN			D

序号	设备类	失效模式	5%置信下限	均值	95%置信上限	误差因子	后验分布			数据来源 ⁽¹⁾
							分布类型 ⁽²⁾	α/ξ	β/m	
6	电磁阀	FO:拒开	2.70E-06	9.54E-04	3.74E-03	37.22	Beta	0.47	4.93E+02	M
		FC:拒关	2.70E-06	9.54E-04	3.74E-03	37.22	Beta	0.47	4.93E+02	M
		FA:运行中卡死	3.21E-10	3.00E-06	1.37E-05	206.59	Gamma	0.30	1.00E+05	M
		SA:误动作	9.88E-12	9.23E-08	4.22E-07	206.67	Gamma	0.30	3.25E+06	M
7	先导式安全阀 ⁽³⁾	FO:拒开	1.30E-05	7.25E-03	2.92E-02	47.39	Beta	0.44	5.96E+01	M
		FC:拒关	4.29E-06	1.09E-03	4.18E-03	31.21	Beta	0.50	4.59E+02	M
		SA:误动作	4.95E-11	4.63E-07	2.12E-06	206.95	Gamma	0.30	6.48E+05	M
8	弹簧加载式安全阀 ⁽⁴⁾	FO:拒开	2.66E-07	2.47E-03	1.13E-02	206.11	Beta	0.30	1.21E+02	M
		FP:卡开	2.66E-07	6.76E-05	2.60E-04	31.26	Beta	0.50	7.39E+03	M
		SA:误动作	2.27E-11	2.12E-07	9.71E-07	206.82	Gamma	0.30	1.41E+06	M
		FL:过水卡开	4.62E-04	1.00E-01	3.62E-01	27.99	Beta	0.50	4.50E+00	M
9	逆止阀	FO:拒开	4.03E-06	1.76E-05	3.90E-05	3.11	Beta	2.50	1.42E+05	B
		FC:拒关	1.00E-05	3.23E-05	6.49E-05	2.55	Beta	3.50	1.08E+05	B
10	手动阀	FO:拒开	5.50E-06	4.69E-05	1.22E-04	4.71	Beta	1.50	3.20E+04	B
		FC:拒关	1.79E-05	7.81E-05	1.73E-04	3.11	Beta	2.50	3.20E+04	B

序号	设备类	失效模式	5%置信下限	均值	95%置信上限	误差因子	后验分布			数据来源 ⁽¹⁾
							分布类型 ⁽²⁾	α/ξ	β/m	
11	应急柴油	FS:启动失效	4.37E-03	6.40E-03	8.93E-03	1.43	LN			D
	发电机组	FR:运转失效	3.67E-04	1.03E-03	2.17E-03	2.43	LN			D
12	其它柴油	FS:启动失效								W
	发电机组	FR:运转失效								W
13	小汽轮发	FS:启动失效	4.67E-03	9.44E-03	1.65E-02	1.88	LN			D
	电机组	FR:运转失效	2.50E-04	8.07E-04	1.62E-03	2.55	Gamma	3.50	4.34E+03	B
14	控制棒驱动 机构电源系 统电动发电 机组	FR:运转失效								W
15	电路 断路器	F0:拒开	1.55E-05	4.79E-05	9.48E-05	2.48	Beta	3.70	7.72E+04	B
		FC:拒关	6.66E-05	1.17E-04	1.85E-04	1.67	LN			D
		SA:误动作	1.09E-08	2.73E-08	5.38E-08	2.22	LN			D
16	停堆 断路器	F0:拒开	1.25E-05	5.44E-05	1.20E-04	3.11	Beta	2.50	4.60E+04	B

序号	设备类	失效模式	5%置信下限	均值	95%置信上限	误差因子	后验分布			数据来源 ⁽¹⁾
							分布类型 ⁽²⁾	α/ξ	β/m	
17	母线	FW:运行失效	1.74E-09	4.34E-07	1.67E-06	30.98	Gamma	0.50	1.16E+06	M
18	蓄电池组	FW:运行失效	2.94E-09	1.86E-06	7.57E-06	50.74	Gamma	0.43	2.29E+05	M
19	电池充电器	FW:运行失效	1.01E-06	1.73E-06	2.70E-06	1.63	LN			D
20	逆变器	FW:运行失效	3.86E-07	9.57E-07	1.73E-06	2.12	Gamma	5.20	5.44E+06	B
21	继电器	FW:运行失效								W
22	过滤器	GP:堵塞	1.61E-06	2.31E-06	3.16E-06	1.40	LN			D
23	旋转滤网	GP:堵塞	1.87E-08	4.68E-06	1.80E-05	31.03	Gamma	0.50	1.07E+05	M
24	地坑滤网	GP:堵塞								W
25	孔板	GP:堵塞	1.07E-10	1.00E-06	4.57E-06	206.66	Gamma	0.30	3.00E+05	M
26	板式热交换器	GP:堵塞	6.86E-08	6.45E-07	1.71E-06	4.99	Gamma	1.42	2.20E+06	M
		IL:内漏	5.82E-07	1.45E-06	2.87E-06	2.22	LN			D
		EL:外漏	7.67E-08	2.48E-07	4.98E-07	2.55	Gamma	3.50	1.41E+07	B
27	管式热交换器	GP:堵塞	6.86E-08	6.45E-07	1.71E-06	4.99	Gamma	1.42	2.20E+06	M
		IL:内漏	1.72E-07	4.80E-07	9.13E-07	2.30	Gamma	4.30	8.96E+06	B

序号	设备类	失效模式	5%置信下限	均值	95%置信上限	误差因子	后验分布			数据来源 ⁽¹⁾
							分布类型 ⁽²⁾	α/ξ	β/m	
		EL:外漏	9.41E-08	2.55E-07	4.79E-07	2.26	Gamma	4.50	1.77E+07	B
28	水箱	EP:外漏(承压)	1.55E-10	3.93E-08	1.51E-07	31.21	Gamma	0.50	1.27E+07	M
		EN:外漏(常压)	1.25E-10	3.19E-08	1.23E-07	31.37	Gamma	0.50	1.57E+07	M
29	储气罐	FF:功能丧失	1.21E-09	1.32E-08	3.59E-08	5.45	Gamma	1.30	9.89E+07	B
30	变压器	FW:运行失效	5.07E-07	8.66E-07	1.35E-06	1.63	LN			D
31	传感器/变送器	FW:运行失效	1.26E-06	1.40E-06	1.56E-06	1.12	LN			D
32	风机	FS:启动失效	5.77E-05	1.62E-04	3.42E-04	2.43	LN			D
		FR:运转失效	1.06E-06	1.86E-06	2.95E-06	1.67	LN			D
33	冷冻机组	FS:启动失效	1.18E-03	3.06E-03	5.67E-03	2.19	Beta	4.82	1.57E+03	B
		FR:运转失效	1.88E-07	1.62E-06	4.23E-06	4.75	Gamma	1.49	9.18E+05	B
34	空气压缩机组	FS:启动失效	2.28E-04	6.30E-04	1.19E-03	2.29	Beta	4.36	6.92E+03	B
		FR:运转失效	4.17E-06	1.04E-05	2.06E-05	2.22	LN			D
35	空气干燥器	FF:功能丧失	2.40E-05	3.46E-05	4.77E-05	1.41	LN			D

序号	设备类	失效模式	5%置信下限	均值	95%置信上限	误差因子	后验分布			数据来源 ⁽¹⁾
							分布类型 ⁽²⁾	α/ξ	β/m	
36	控制棒及驱动机构 ⁽⁵⁾	FF:功能丧失	1.26E-05	5.52E-05	1.22E-04	3.11	Beta	2.50	4.53E+04	B

注：表中数据来源：“B”表示用美国NUREG/CR-6928数据和电厂统计数据经贝叶斯处理后的后验数据，“D”表示根据电厂统计数据使用经典估计方法计算得到的数据，“M”表示美国NUREG/CR-6928数据，“W”表示该设备类无先验数据且电厂统计失效次数小于5次，暂不进行处理的数据。

- (1) 分布类型中：Gamma 表示伽马分布，Beta表示贝塔分布，LN表示对数正态分布。
- (2) 先导式安全阀主要指余热排出系统/反应堆冷却剂系统的保护和隔离阀。
- (3) 弹簧加载式安全阀包括主蒸汽系统的安全阀。
- (4) 控制棒及驱动机构功能丧失参数值为单束棒卡住的概率，计算每次反应堆自动停堆至少1束棒被卡住的概率时应乘以机组控制棒束数。

2 安全重要设备（列）不可用度

本章对我国在运核电机组商运至 2013 年底（包括大亚湾/岭澳一期/岭澳二期/秦山一厂/秦山二厂/田湾核电厂共 13 台机组，123 个堆年）的安全重要系统列（包括高压安注系统、低压安注系统、辅助给水系统、设备冷却水系统、重要厂用水、应急柴油发电机组）的要求可用时间和累计不可用时间进行了统计（见表 2.1），并用经典估计方法计算得到各设备列的不可用度估计结果（见表 2.2）。

表 2.1 设备（列）不可用数据统计表

序号	系统	设备（列）	累计不可用时间 （小时）	要求可用时间 （小时）
1	辅助给水系统	电动泵	619.74	1986175
2	辅助给水系统	汽动泵	997.53	910782
3	辅助给水系统	柴油机泵	779	130621
4	安全壳喷淋系统	电动泵	1398.2	1986175
5	应急柴油发电机组	柴油发电机	5076.6	1818503
6	低压安注系统	电动泵	94.98	1327993
7	高压安注系统	电动泵	662.65	1327993
8	设备冷却水系统	电动泵	19283.9	3057947
9	重要厂用水系统	电动泵	33162.99	3580431

表 2.2 设备（列）不可用度表

序号	系统	设备（列）	5%置信下限	不可用度 （均值）	95%置信上限	误差因子	分布类型	数据来源
1	辅助给水系统	电动泵	2.15E-04	3.12E-04	4.33E-04	1.42	LN	D
2	辅助给水系统	汽动泵	8.23E-04	1.10E-03	1.42E-03	1.31	LN	D
3	辅助给水系统	柴油机泵	4.29E-03	5.96E-03	7.99E-03	1.37	LN	D
4	安全壳喷淋系统	电动泵	5.55E-04	7.04E-04	8.76E-04	1.26	LN	D
5	应急柴油发电机组	柴油发电机	2.48E-03	2.79E-03	3.13E-03	1.12	LN	D
6	低压安注系统	电动泵	2.11E-05	7.15E-05	1.64E-04	2.79	LN	D
7	高压安注系统	电动泵	3.48E-04	4.99E-04	6.86E-04	1.40	LN	D
8	设备冷却水系统	电动泵	8.86E-04	6.31E-03	1.89E-02	4.62	LN	D
9	重要厂用水系统	电动泵	2.62E-03	9.26E-03	2.17E-02	2.88	LN	D