

# 中国核电厂设备可靠性数据报告

## (2020 版)

国家核安全局  
二〇二〇年十二月

# 前 言

设备可靠性数据是核电厂开展概率安全分析（PSA）、维修规则（MR）、以可靠性为中心的维修（RCM）等安全评价和可靠性相关工作的重要基础，其准确性将直接影响 PSA、MR 和 RCM 等工作的质量。鉴于核电厂设备可靠性数据工作的重要性，国家核安全局委托生态环境部核与辐射安全中心建立了中国核电厂设备可靠性数据库平台，并负责各运行核电厂上报数据的处理及国家数据报告的编制。

为了指导国内运行核电厂开展设备可靠性数据采集工作，国家核安全局于 2015 年印发了《核电厂设备可靠性数据》，并于 2019 年对其进行了适应性升版，同时将文件名修改为《核电厂设备可靠性数据采集指南》（以下简称指南）。

根据指南的要求，在原有数据的基础上，以美国 NUREG/CR-6928（2007 版）作为通用数据源，采用适当的数据处理方法进行了参数估计，对各核电厂新报送的数据进行了整合和处理，形成《中国核电厂设备可靠性数据报告》（2020 版）（以下简称 2020 版报告）。2020 版报告给出了我国运行核电厂商运至 2018 年底 289 个堆年的 44 个常用设备类的可靠性数据统计结果，以及 6 个安全重要系统的列不可用数据统计结果。其中，昌江核电厂、三门核电厂、海阳核电厂和台山核电厂为首次报送数据，本次数据报告首次涵盖 AP1000 和 EPR 核电厂运行数据。

与之前几版数据报告相比，本文件中设备类和失效模式主要包含以下几点变化：1) 增加了爆破阀、氢气点火器和非能动氢气复合器等三个设备类；2) 传感器设备类分为流量传感器、温度传感器、压力传感器、液位传感器和转速传感器；3) 断路器和母线设备类分为高压和中低压；4) RAM 设备类和逆变器设备类合并为逆变电源设备类；5) 增加了常开逆止阀不能保持开的失效模式。

本文件还与其他国家数据进行了分析对比，综合评价我国核电厂重要设备类的可靠性水平，可供国内各有关单位在概率安全分析、维修规则、以可靠性为中心的维修等安全评价和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

2020 年 12 月

# 目 录

1 设备可靠性数据.....	7
1.1 采集范围.....	7
1.2 数据处理原则.....	1 2
1.3 数据统计结果.....	1 3
2 安全重要设备（列）不可用度.....	2 0
3 数据对比分析.....	2 2
3.1 对比分析.....	2 2
3.2 小结.....	2 6

## 1 设备可靠性数据

### 1.1 采集范围

本章对我国运行核电机组商运至 2018 年底（包括大亚湾核电站 1、2 号机组，岭澳核电站 1、2、3、4 号机组，秦山第一核电站 1 号机组，秦山第二核电站 1、2、3、4 号机组，方家山核电站 1、2 号机组，田湾核电站 1、2、3 号机组，宁德核电站 1、2、3、4 号机组，阳江核电站 1、2、3、4、5 号机组，红沿河核电站 1、2、3、4 号机组，防城港核电站 1、2 号机组，福清核电站 1、2、3、4 号机组，昌江核电站 1、2 号机组，三门核电站 1、2 号机组，海阳核电站 1 号机组和台山核电站 1 号机组，共计 41 台机组 289 个堆年，详见图 1）的 44 个常用设备类的历史数据进行了统计（见表 1.1）。通过统计各电厂约 6 万余个设备，得到各电厂总的设备失效记录 2068 条。

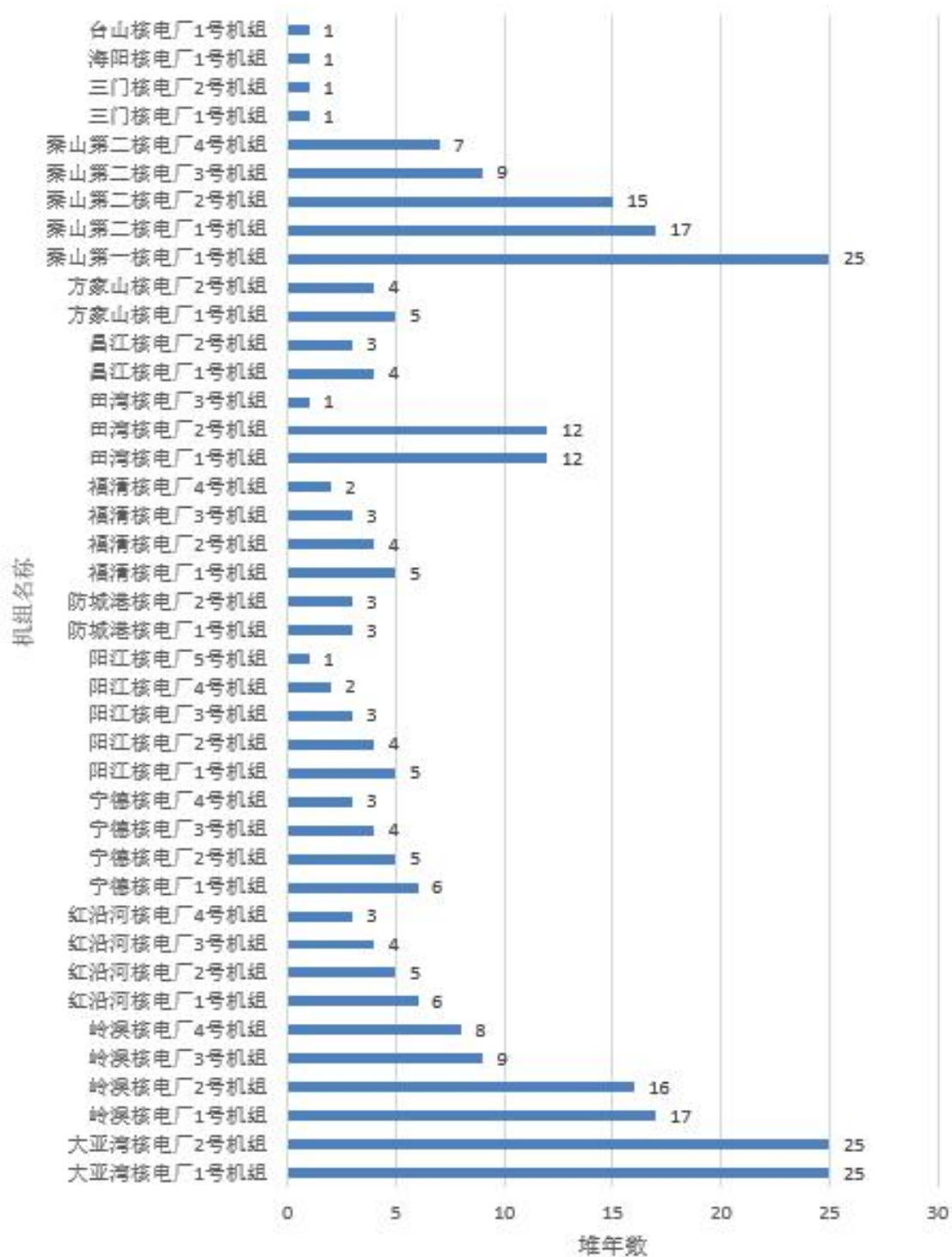


图1 各核电机组堆年数统计（截至2018年底）

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)	总的需求次数(次) / 运行时间(小时)
1	电动泵	FS:启动失效	36	255043
		FR:运转失效	68	19770526.3
2	汽动泵	FS:启动失效	11	7361
		FR:运转失效	2	4018.4
3	柴油机泵	FS:启动失效	0	377
		FR:运转失效	0	120
4	电动阀	F0:拒开	96	226129
		FC:拒关	93	226129
		FA:运行中卡死	5	103500015.7
		SA:误动作	3	239759728.6
5	气动阀	F0:拒开	75	182235
		FC:拒关	31	181959
		FA:运行中卡死	11	109595570.7
		SA:误动作	32	109449266.7
6	电磁阀	F0:拒开	0	29803
		FC:拒关	13	29803
		FA:运行中卡死	4	15905659
		SA:误动作	7	15905659
7	先导式安全阀	F0:拒开	5	10335
		FC:拒关	2	10335
		SA:误动作	1	12275346.4
8	弹簧加载式安全阀	F0:拒开	0	8282
		FP:卡开	0	8282
		SA:误动作	0	32890157.4
		FL:过水卡开	0	0

序号	设备类	失效模式	失效次数 (次)	总的需求次数(次)/ 运行时间(小时)
9	逆止阀	F0:拒开	11	436182
		FC:拒关	88	436182
		FX:不能维持开 <sup>(1)</sup>	0	161472
10	手动阀	F0:拒开	17	57205
		FC:拒关	42	57205
11	应急柴油发电机组	FS:启动失效	49	8198
		FR:运转失效	16	10186.6
12	其它柴油发电机组	FS:启动失效	21	2233
		FR:运转失效	4	1247.4
13	小汽轮发电机组	FS:启动失效	11	1519
		FR:运转失效	4	2538.4
14	高压电路断路器	F0:拒开	1	4385
		FC:拒关	2	5632
		SA:误动作	2	11947987.1
15	中低压电路断路器	F0:拒开	9	195580
		FC:拒关	47	250847
		SA:误动作	27	382732536.8
16	停堆断路器	F0:拒开	3	31916
17	高压母线	FW:运行失效	0	1621648.0
18	中低压母线	FW:运行失效	6	90606086.0
19	蓄电池组	FW:运行失效	2	24292738.8
20	电池充电器	FW:运行失效	29	29508116.3
21	逆变电源	FW:运行失效	36	24600095.8
22	继电器	FW:运行失效	1	24286801.2
23	过滤器	GP:堵塞 <sup>(2)</sup>	88	69717755.9



序号	设备类	失效模式	失效次数 (次)	总的需求次数(次) / 运行时间(小时)
24	旋转滤网	GP:堵塞	49	4210968.8
25	地坑滤网	GP:堵塞	0	0
26	孔板	GP:堵塞	0	84987676.2
27	板式热交换器	GP:堵塞	6	7282070.4
		IL:内漏	14	10648665.0
		EL:外漏	10	10648664.0
28	管式热交换器	GP:堵塞	0	15700981.5
		IL:内漏	7	19610039.8
		EL:外漏	11	19610039.8
29	水箱	EP:外漏(承压)	1	26452327.5
		EN:外漏(常压)	4	41149508.7
30	储气罐	FF:功能丧失	2	27147910.8
31	变压器	FW:运行失效	17	34474372.6
32	流量传感器/变送器	FW:运行失效	159	124331586.4
33	液位传感器/变送器	FW:运行失效	171	71328862.9
34	压力传感器/变送器	FW:运行失效	108	99094857.5
35	温度传感器/变送器	FW:运行失效	65	228641428.4
36	转速传感器/变送器	FW:运行失效	16	28645509.4
37	风机	FS:启动失效	13	133779
		FR:运转失效	53	15936288.5
38	冷冻机组	FS:启动失效	101	17690
		FR:运转失效	119	4502188.6
39	空气压缩机组	FS:启动失效	41	150569
		FR:运转失效	68	2281865.9
40	空气干燥器	FF:功能丧失 <sup>(3)</sup>	20	5869904.9

序号	设备类	失效模式	失效次数 (次)	总的需求次数(次)/ 运行时间(小时)
41	控制棒及驱动机构	FF:功能丧失	2	15123
42	爆破阀	F0:拒开	0	6
43	非能动氢气复合器	FF:功能丧失	0	5688276.6
44	氢气点火器	FF:功能丧失	0	0

注释:

- (1) 这里特指AP1000核电厂常开逆止阀不能保持开的失效模式。
- (2) 根据业界共识对失效判定准则进行更改,将之前部分失效记录剔除,过滤器设备类堵塞失效模式的失效次数较之前有一定变化。
- (3) 根据业界共识对失效判定准则进行更改,将之前部分失效记录剔除,空气干燥器设备类功能丧失失效模式失效次数较之前有一定变化。

## 1.2 数据处理原则

本报告中设备可靠性数据的处理原则如下:

(1) 对于失效次数大于或等于 5 次的设备类,其可靠性参数按经典估计方法处理;

(2) NUREG/CR-6928 中有对应数据的设备类,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 NUREG/CR-6928 中有对应数据的设备类,其可靠性参数直接使用 NUREG/CR-6928 通用数据;

(4) 对于失效次数小于 5 次且 NUREG/CR-6928 中没有对应数据的设备类,其失效数据暂不进行估计,待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),采用贝叶斯估计方法的不确定性分布类型与 NUREG/CR-6928 中的类型保持一致。

本报告中共统计得到 79 个可靠性参数结果。其中，47 个通过经典估计得到，16 个通过贝叶斯估计方法处理得到，9 个直接参考美国 NUREG/CR-6928 数据，7 个暂不具备估计条件。

### 1.3 数据统计结果

根据 1.1 节中统计结果，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 44 个设备类不同失效模式的可靠性数据（见表 1.2）。

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	分布类型及分布参数			数据来源 <sup>(1)</sup>
							分布类型 <sup>(2)</sup>	$\alpha / \xi$	$\beta / m$	
1	电动泵	FS:启动失效	1.05E-04	1.41E-04	1.86E-04	1.33E+00	LN			D
		FR:运转失效	2.78E-06	3.44E-06	4.21E-06	1.23E+00	LN			D
2	汽动泵	FS:启动失效	8.38E-04	1.49E-03	2.47E-03	1.72E+00	LN			D
		FR:运转失效	8.70E-05	2.94E-04	6.01E-04	2.63E+00	Gamma	3.30E+00	1.12E+04	B
3	柴油机泵	FS:启动失效	4.17E-07	3.88E-03	1.77E-02	2.06E+02	Beta	3.00E-01	7.73E+03	M
		FR:运转失效	1.29E-06	1.57E-04	5.64E-04	2.09E+01	Gamma	5.80E-01	3.73E+03	M
4	电动阀	FO:拒开	3.56E-04	4.25E-04	5.03E-04	1.19E+00	LN			D
		FC:拒关	3.44E-04	4.11E-04	4.89E-04	1.19E+00	LN			D
		FA:运行中卡死	1.90E-08	4.83E-08	1.02E-07	2.31E+00	LN			D
		SA:误动作	4.32E-09	1.39E-08	2.80E-08	2.55E+00	Gamma	3.50E+00	2.51E+08	B
5	气动阀	FO:拒开	3.37E-04	4.12E-04	4.99E-04	1.22E+00	LN			D
		FC:拒关	1.23E-04	1.70E-04	2.30E-04	1.36E+00	LN			D
		FA:运行中卡死	5.63E-08	1.00E-07	1.66E-07	1.72E+00	LN			D
		SA:误动作	2.13E-07	2.92E-07	3.93E-07	1.36E+00	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	分布类型及分布参数			数据来源 <sup>(1)</sup>
							分布类型 <sup>(2)</sup>	$\alpha / \xi$	$\beta / m$	
6	电磁阀	FO:拒开	2.70E-06	9.54E-04	3.74E-03	3.72E+01	Beta	4.71E-01	4.93E+02	M
		FC:拒关	2.58E-04	4.36E-04	6.93E-04	1.64E+00	LN			D
		FA:运行中卡死	9.64E-08	2.69E-07	5.11E-07	2.30E+00	Gamma	4.30E+00	1.60E+07	B
		SA:误动作	2.07E-07	4.40E-07	8.27E-07	2.00E+00	LN			D
7	先导式安全阀	FO:拒开	1.91E-04	4.84E-04	1.02E-03	2.31E+00	LN			D
		FC:拒关	5.31E-05	2.32E-04	5.13E-04	3.11E+00	Beta	2.50E+00	1.08E+04	B
		SA:误动作	9.15E-09	1.01E-07	2.75E-07	5.48E+00	Gamma	1.30E+00	1.29E+07	B
8	弹簧加载式安全阀	FO:拒开	2.66E-07	2.47E-03	1.13E-02	2.06E+02	Beta	3.00E-01	1.21E+02	M
		FP:卡开	2.66E-07	6.76E-05	2.60E-04	3.13E+01	Beta	5.00E-01	7.39E+03	M
		SA:误动作	2.00E-11	2.12E-07	9.71E-07	2.20E+02	Gamma	3.00E-01	1.41E+06	M
		FL:过水卡开	4.62E-04	1.00E-01	3.62E-01	2.80E+01	Gamma	5.00E-01	4.50E+00	M
9	逆止阀	FO:拒开	1.41E-05	2.52E-05	4.17E-05	1.72E+00	LN			D
		FC:拒关	1.68E-04	2.02E-04	2.41E-04	1.20E+00	LN			D
		FX:不能维持开	-	-	-	-	-			W
10	手动阀	FO:拒开	1.89E-04	2.97E-04	4.46E-04	1.53E+00	LN			D
		FC:拒关	5.58E-04	7.34E-04	9.50E-04	1.30E+00	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	分布类型及分布参数			数据来源 <sup>(1)</sup>
							分布类型 <sup>(2)</sup>	$\alpha / \xi$	$\beta / m$	
11	应急柴油发电机组	FS:启动失效	4.64E-03	5.98E-03	7.58E-03	1.28E+00	LN			D
		FR:运转失效	9.85E-04	1.57E-03	2.39E-03	1.56E+00	LN			D
12	其它柴油发电机组	FS:启动失效	6.30E-03	9.40E-03	1.35E-02	1.47E+00	LN			D
		FR:运转失效	-	-	-	-	-			W
13	小汽轮发电机组	FS:启动失效	4.06E-03	7.24E-03	1.20E-02	1.72E+00	LN			D
		FR:运转失效	3.62E-04	9.81E-04	1.84E-03	2.26E+00	Gamma	4.50E+00	4.59E+03	B
14	高压电路断路器	FO:拒开	5.19E-05	3.65E-04	9.11E-04	4.19E+00	Beta	1.70E+00	4.66E+03	B
		FC:拒关	1.13E-04	4.57E-04	9.89E-04	2.96E+00	Beta	2.70E+00	5.90E+03	B
		SA:误动作	5.75E-08	1.69E-07	3.28E-07	2.39E+00	Gamma	3.98E+00	2.35E+07	B
15	中低压电路断路器	FO:拒开	2.40E-05	4.60E-05	8.03E-05	1.83E+00	LN			D
		FC:拒关	1.45E-04	1.87E-04	2.39E-04	1.28E+00	LN			D
		SA:误动作	4.98E-08	7.06E-08	9.73E-08	1.40E+00	LN			D
16	停堆断路器	FO:拒开	1.69E-05	5.46E-05	1.10E-04	2.55E+00	Beta	3.50E+00	6.41E+04	B
17	高压母线	FW:运行失效	-	-	-	-	-			W
18	中低压母线	FW:运行失效	2.88E-08	6.62E-08	1.31E-07	2.13E+00	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	分布类型及分布参数			数据来源 <sup>(1)</sup>
							分布类型 <sup>(2)</sup>	$\alpha / \xi$	$\beta / m$	
19	蓄电池组	FW:运行失效	2.20E-08	9.90E-08	2.21E-07	3.17E+00	Gamma	2.43E+00	2.45E+07	B
20	电池充电器	FW:运行失效	7.03E-07	9.83E-07	1.34E-06	1.38E+00	LN			D
21	逆变电源	FW:运行失效	1.09E-06	1.46E-06	1.93E-06	1.33E+00	LN			D
22	继电器	FW:运行失效	7.24E-09	6.17E-08	1.61E-07	4.71E+00	Gamma	1.50E+00	2.43E+07	B
23	过滤器	GP:堵塞	1.05E-06	1.26E-06	1.51E-06	1.20E+00	LN			D
24	旋转滤网	GP:堵塞	9.04E-06	1.16E-05	1.48E-05	1.28E+00	LN			D
25	地坑滤网	GP:堵塞	-	-	-	-	-			W
26	孔板	GP:堵塞	1.10E-10	1.00E-06	4.57E-06	2.04E+02	Gamma	3.00E-01	3.00E+05	M
27	板式热交换器	GP:堵塞	3.59E-07	8.24E-07	1.63E-06	2.13E+00	LN			D
		IL:内漏	7.95E-07	1.31E-06	2.05E-06	1.61E+00	LN			D
		EL:外漏	5.09E-07	9.39E-07	1.59E-06	1.77E+00	LN			D
28	管式热交换器	GP:堵塞	6.86E-08	6.45E-07	1.71E-06	4.99E+00	Gamma	1.42E+00	2.20E+06	M
		IL:内漏	1.68E-07	3.57E-07	6.70E-07	2.00E+00	LN			D
		EL:外漏	3.15E-07	5.61E-07	9.28E-07	1.72E+00	LN			D
29	水箱	EP:外漏 (承压)	4.49E-09	3.83E-08	9.98E-08	4.71E+00	Gamma	1.50E+00	3.92E+07	B
		EN:外漏 (常压)	2.92E-08	7.92E-08	1.49E-07	2.26E+00	Gamma	4.50E+00	5.68E+07	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	分布类型及分布参数			数据来源 <sup>(1)</sup>
							分布类型 <sup>(2)</sup>	$\alpha / \xi$	$\beta / m$	
30	储气罐	FF:功能丧失	1.45E-08	6.92E-08	1.57E-07	3.29E+00	Gamma	2.30E+00	3.32E+07	B
31	变压器	FW:运行失效	3.14E-07	4.93E-07	7.40E-07	1.53E+00	LN			D
32	流量传感器/变送器	FW:运行失效	1.12E-06	1.28E-06	1.46E-06	1.14E+00	LN			D
33	液位传感器/变送器	FW:运行失效	2.10E-06	2.40E-06	2.72E-06	1.14E+00	LN			D
34	压力传感器/变送器	FW:运行失效	9.23E-07	1.09E-06	1.28E-06	1.18E+00	LN			D
35	温度传感器/变送器	FW:运行失效	2.29E-07	2.84E-07	3.49E-07	1.24E+00	LN			D
36	转速传感器/变送器	FW:运行失效	3.50E-07	5.59E-07	8.48E-07	1.56E+00	LN			D
37	风机	FS:启动失效	5.75E-05	9.72E-05	1.54E-04	1.64E+00	LN			D
		FR:运转失效	2.61E-06	3.33E-06	4.18E-06	1.26E+00	LN			D
38	冷冻机组	FS:启动失效	4.81E-03	5.71E-03	6.74E-03	1.18E+00	LN			D
		FR:运转失效	2.26E-05	2.64E-05	3.08E-05	1.17E+00	LN			D
39	空气压缩机组	FS:启动失效	2.06E-04	2.72E-04	3.53E-04	1.31E+00	LN			D
		FR:运转失效	2.41E-05	2.98E-05	3.65E-05	1.23E+00	LN			D
40	空气干燥器	FF:功能丧失	2.26E-06	3.41E-06	4.95E-06	1.48E+00	LN			D
41	控制棒及驱动机构 <sup>(3)</sup>	FF:功能丧失	1.08E-05	4.72E-05	1.04E-04	3.11E+00	Beta	2.50E+00	5.30E+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	分布类型及分布参数			数据来源 <sup>(1)</sup>
							分布类型 <sup>(2)</sup>	$\alpha / \xi$	$\beta / m$	
42	爆破阀	FO: 拒开	-	-	-	-	-			W
43	非能动氢气复合器	FF: 功能丧失	-	-	-	-	-			W
44	氢气点火器	FF: 功能丧失	-	-	-	-	-			W

注:

- (1) 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估计方法处理后的后验数据, “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。
- (2) 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。本报告对于采用经典估计的数据均假设符合对数正态分布。
- (3) 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 2018 年底的安全重要系统列（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）	要求可用时间（小时）	随机不可用时间（小时）	计划不可用时间（小时）
1	辅助给水系统 <sup>(1)</sup>	电动泵	4432186.86	4825.98	633.73
2	辅助给水系统	汽动泵	2623912.56	5593.96	374.25
3	辅助给水系统	柴油机泵	882291.52	577.86	76.33
4	安全壳喷淋系统	电动泵	4407078.99	4875.72	2424.47
5	应急柴油发电机组	柴油发电机	4486585.44	14807.88	5038.45
6	低压安注系统	电动泵	4423817.57	4592.75	7387.32
7	高压安注系统	电动泵	5272624.29	12720.24	1757.63
8	设备冷却水系统	电动泵	7165746.77	20535.77	34759.53
9	重要厂用水系统	电动泵	7899752.42	37697.57	61172.39

注：

(1) VVER核电厂叫做应急给水系统。

2.2 设备（列）不可用度表

序号	系统	设备（列）	均值	误差因子 <sup>(1)</sup>	分布类型	数据来源
1	辅助给水系统	电动泵	1.232E-03	3E+00	LN	D
2	辅助给水系统	汽动泵	2.275E-03	3E+00	LN	D

序号	系统	设备（列）	均值	误差因子 <sup>(1)</sup>	分布类型	数据来源
3	辅助给水系统	柴油机泵	7.415E-04	3E+00	LN	D
4	安全壳喷淋系统	电动泵	1.656E-03	3E+00	LN	D
5	应急柴油发电机组	柴油发电机	4.423E-03	3E+00	LN	D
6	低压安注系统	电动泵	2.708E-03	3E+00	LN	D
7	高压安注系统	电动泵	2.746E-03	3E+00	LN	D
8	设备冷却水系统	电动泵	7.717E-03	3E+00	LN	D
9	重要厂用水系统	电动泵	1.252E-02	3E+00	LN	D

注：

- (1) 结合工程实践经验及专家判断，建议安全重要系统设备（列）不可用度误差因子取为3。

### 3 数据对比分析

#### 3.1 对比分析

表 3.1 给出了 2020 版报告与美国 NUREG/CR-6928 (2007 年版)、法国 1996 年出版的《用于 900MW 和 1300MW 概率安全分析的设备定义和通用可靠性数据》(EPS900&1300) 和俄罗斯《SRINPP 数据报告》等其他国家数据对比情况。

下面对 PSA 中重要度较高的部分设备类的失效次数和可靠性参数进行简单的对比分析与讨论。

##### 电动泵

电动泵统计到启动失效 36 次、需求次数 255043 次，运转失效 68 次、运行时间 19770526.3 小时。通过估计得到的启动失效概率与运转失效率均低于其他国家数据。

设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
电动泵	FS:启动失效	1.41E-04	2.23E-03	9.78E-04	2.40E-03
	FR:运转失效	3.44E-06	4.54E-06	1.32E-04	5.72E-05

##### 汽动泵

汽动泵统计到启动失效 11 次、需求次数 7361 次，运转失效 2 次、运行时间 4018.4 小时。通过估计得到的启动失效概率和运转失效率与其他国家数据水平相当。

设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
汽动泵	FS:启动失效	1.49E-03	6.88E-03	1.54E-03	-
	FR:运转失效	2.94E-04	1.84E-05	6.70E-04	-

## 电动阀

电动阀统计到拒开 96 次、需求次数 226129 次，拒关 93 次、需求次数 226129 次，运行中卡死 5 次、运行时间 103500015.7 小时，误动作 3 次、运行时间 239759728.6 小时。通过估计得到的拒开和拒关失效概率与其他国家数据水平相当。目前，电动阀运行中卡死失效模式已采用经典估计得到相应参数值，设备失效参数低于 NUREG/CR-6928 数据。电动阀误动作失效模式也已采用经典估计得到相应参数值，低于其他国家数据。

设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据 报告
电动阀	FO:拒开	4.25E-04	1.07E-03	1.00E-04	6.41E-04
	FC:拒关	4.11E-04	1.07E-03	3.00E-04	3.49E-04
	FA:运行中卡死	4.83E-08	3.00E-06	-	-
	SA:误动作	1.39E-08	4.45E-08	-	5.28E-06

## 气动阀

气动阀统计到拒开 75 次、需求次数 182235 次，拒关 31 次、需求次数 182235 次，运行中卡死 11 次、运行时间 109595570.7 小时，误动作 32 次、运行时间 109595570.7 小时。通过估计得到的拒开和

拒关失效概率与其他国家数据水平相当，运行中卡死失效率低于美国数据，误动作失效率与其他国家数据水平相当。

设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据 报告
气动阀	FO:拒开	4.12E-04	1.11E-03	1.50E-04	-
	FC:拒关	1.70E-04	1.11E-03	1.90E-04	-
	FA:运行中 卡死	1.00E-07	3.00E-06	-	-
	SA:误动作	2.92E-07	1.82E-07	1.30E-07	-

### 应急柴油发电机组

应急柴油发电机组统计到启动失效 49 次、需求次数 8198 次，运转失效 16 次、运行时间 10186.6 小时。通过估计得到启动失效概率高于其他国家数据，运转失效率与法国数据相当，但高于美国和俄罗斯数据。

设备类	失效模式	中国数据 报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数 据报告
应急柴油发电 机组	FS:启动 失效	5.98E-03	4.53E-03	2.70E-03	3.59E-03
	FR:运转 失效	1.57E-03	9.69E-04	1.70E-03	7.98E-04

### 传感器/变送器

本数据报告首次将传感器/变送器设备类细分为流量、液位、压力、温度和转速传感器/变送器。这五个设备类已具备足够的统计样本，都采用了经典估计法得到相应的可靠性参数。流量传感器/变速

器运行失效 159 次、运行时间 124331586.4 小时，失效率高于美国数据，低于法国数据。液位传感器/变速器运行失效 171 次、运行时间 71328862.9 小时，失效率高于其他国家数据。压力传感器/变速器运行失效 108 次、运行时间 99094857.5 小时，失效率高于美国数据，低于法国数据。温度传感器/变速器运行失效 65 次、运行时间 228641428.4 小时，失效率高于美国数据，低于法国数据。转速传感器/变速器运行失效 16 次、运行时间 28645509.4 小时，失效率低于法国数据。

设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
流量传感器/ 变速器	FW:运行失效	1.28E-06	1.02E-07	2.70E-06	-
液位传感器/ 变速器	FW:运行失效	2.40E-06	1.02E-07	1.20E-06	-
压力传感器/ 变速器	FW:运行失效	1.09E-06	8.22E-07	2.80E-06	-
温度传感器/ 变速器	FW:运行失效	2.84E-07	8.40E-07	8.00E-07	-
转速传感器/ 变速器	FW:运行失效	5.59E-07	-	1.80E-06	-

### 控制棒及驱动机构

控制棒及驱动机构统计到功能丧失 2 次、需求次数 15123 次。设备失效概率高于其他国家数据。

设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
控制棒及 驱动机构	FF:功能 丧失	4.72E-05	1.32E-05	1.47E-05	-

### 3.2 小结

随着各核电营运单位上报数据的不断累积，我国核电厂设备可靠性数据统计样本已具备相当数量，设备可靠性数据结果具备较高的置信度。总的来看，我国数据与其他国家数据相比，设备可靠性水平总体相当。



表 3.1 与其他国家数据对比情况

序号	设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
1	电动泵	FS:启动失效	1.41E-04	2.23E-03	9.78E-04	2.40E-03
		FR:运转失效	3.44E-06	4.54E-06	1.32E-04	5.72E-05
2	汽动泵	FS:启动失效	1.49E-03	6.88E-03	1.54E-03	-
		FR:运转失效	2.94E-04	1.84E-05	6.70E-04	-
3	柴油机泵	FS:启动失效	3.88E-03	3.88E-03	3.60E-03	-
		FR:运转失效	1.57E-04	1.57E-04	1.80E-04	-
4	电动阀	FO:拒开	4.25E-04	1.07E-03	1.00E-04	6.41E-04
		FC:拒关	4.11E-04	1.07E-03	3.00E-04	3.49E-04
		FA:运行中卡死	4.83E-08	3.00E-06	-	-
		SA:误动作	1.39E-08	4.45E-08	-	5.28E-06
5	气动阀	FO:拒开	4.12E-04	1.11E-03	1.50E-04	-
		FC:拒关	1.70E-04	1.11E-03	1.90E-04	-
		FA:运行中卡死	1.00E-07	3.00E-06	-	-
		SA:误动作	2.92E-07	1.82E-07	1.30E-07	-

序号	设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
6	电磁阀	FO:拒开	9.54E-04	9.54E-04	1.00E-03	-
		FC:拒关	4.36E-04	9.54E-04	1.00E-03	-
		FA:运行中卡死	2.69E-07	3.00E-06	2.00E-06	-
		SA:误动作	4.40E-07	9.23E-08	5.00E-07	-
7	先导式安全阀	FO:拒开	4.84E-04	7.25E-03	1.70E-05	2.14E-03
		FC:拒关	2.32E-04	1.09E-03	1.70E-05	4.87E-03
		SA:误动作	1.01E-07	4.63E-07	1.60E-07	-
8	弹簧加载式安全阀	FO:拒开	2.47E-03	7.71E-03	1.60E-05	1.21E-03
		FP:卡开	6.76E-05	7.95E-04	1.60E-05	1.19E-03
		SA:误动作	2.12E-07	5.08E-07	7.90E-08	-
		FL:过水卡开	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	-
9	逆止阀	FO:拒开	2.52E-05	1.30E-05	1.40E-04	6.91E-05
		FC:拒关	2.02E-04	1.04E-04	1.40E-04	4.43E-05
10	手动阀	FO:拒开	2.97E-04	7.43E-04	4.50E-05	-
		FC:拒关	7.34E-04	7.43E-04	4.50E-05	-

序号	设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
11	应急柴油发电机组	FS:启动失效	5.98E-03	4.53E-03	2.70E-03	3.59E-03
		FR:运转失效	1.57E-03	9.69E-04	1.70E-03	7.98E-04
12	其它柴油发电机组	FS:启动失效	9.40E-03	-	-	-
		FR:运转失效	-	-	-	-
13	小汽轮发电机组	FS:启动失效	7.24E-03	1.96E-03	-	-
		FR:运转失效	9.81E-04	4.20E-04	-	-
14	控制棒驱动机构电源系统电动发电机组	FR:运转失效	-	-	5.90E-06	-
15	电路断路器	FO:拒开	4.11E-04	2.55E-03	3.90E-04	1.80E-03
		FC:拒关	6.45E-04	2.55E-03	2.20E-03	1.80E-03
		SA:误动作	2.4E-07	1.71E-07	4.50E-06	9.88E-07
16	停堆断路器	FO:拒开	5.46E-05	1.55E-05	2.20E-04	6.48E-05
17	母线	FW:运行失效	6.62E-08	4.34E-07	-	5.00E-07
18	蓄电池组	FW:运行失效	9.90E-08	1.86E-06	1.70E-06	4.17E-07
19	电池充电器	FW:运行失效	9.83E-07	5.08E-06	9.70E-07	2.95E-06
20	逆变器	FW:运行失效	1.46E-06	5.28E-06	1.20E-05	7.25E-06

序号	设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
21	继电器	FW:运行失效	6.17E-08	2.48E-05	2.80E-07	5.67E-07
22	过滤器	GP:堵塞	1.26E-06	7.38E-06	1.60E-06	3.00E-05
23	旋转滤网	GP:堵塞	1.16E-05	-	1.60E-06	-
24	地坑滤网	GP:堵塞	-	-	1.00E-05	5.00E-05
25	孔板	GP:堵塞	1.00E-06	1.00E-06	3.00E-05	-
26	板式热交换器	GP:堵塞	8.24E-07	6.45E-07	1.00E-04	2.97E-07
		IL:内漏	1.31E-06	2.67E-07	3.20E-08	-
		EL:外漏	9.39E-07	5.35E-08	3.20E-08	-
27	管式热交换器	GP:堵塞	6.45E-07	6.45E-07	-	6.99E-07
		IL:内漏	3.57E-07	2.67E-07	5.00E-06	-
		EL:外漏	5.61E-07	5.35E-08	5.00E-06	-
28	水箱	EP:外漏 (承压)	3.83E-08	5.29E-08	2.40E-07	7.22E-08
		EN:外漏 (常压)	7.92E-08	4.41E-08	5.40E-08	7.22E-08
29	储气罐	FF:功能丧失	6.92E-08	-	3.00E-09	7.22E-08
30	变压器	FW:运行失效	4.93E-07	9.04E-07	2.60E-06	7.29E-06

序号	设备类	失效模式	中国数据报告	美国 NUREG/CR-6928	法国 EPS900&1300	俄罗斯 SRINPP 数据报告
31	流量传感器/变速器	FW:运行失效	1.28E-06	1.02E-07	2.70E-06	-
	液位传感器/变速器	FW:运行失效	2.40E-06	1.02E-07	1.20E-06	-
	压力传感器/变速器	FW:运行失效	1.09E-06	8.22E-07	2.80E-06	-
	温度传感器/变速器	FW:运行失效	2.84E-07	8.40E-07	8.00E-07	-
	转速传感器/变速器	FW:运行失效	5.59E-07	-	1.80E-06	-
32	风机	FS:启动失效	9.72E-05	1.79E-03	1.20E-04	1.80E-04
		FR:运转失效	3.33E-06	1.08E-05	2.40E-05	5.09E-06
33	冷冻机组	FS:启动失效	5.71E-03	9.83E-03	-	-
		FR:运转失效	2.64E-05	9.42E-05	-	-
34	空气压缩机组	FS:启动失效	2.72E-04	-	3.00E-04	-
		FR:运转失效	2.98E-05	-	9.00E-05	2.00E-04
35	空气干燥器	FF:功能丧失	3.41E-06	5.00E-06	2.00E-07	-
36	控制棒及驱动机构	FF:功能丧失(单束棒卡住的概率)	4.72E-05	1.32E-05	1.47E-05	-