



不同冗余模式下泵组数字化控制可靠性研究

钱虹 于凯翔 徐志辉 苏晓燕

Research on Digital Control Reliability of Pump Groups Under Different Redundancy Modes

QIAN Hong, YU Kaixiang, XU Zhihui, SU Xiaoyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022062>

引用格式:

钱虹, 于凯翔, 徐志辉, 苏晓燕. 不同冗余模式下泵组数字化控制可靠性研究[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(2):314–326. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022062

QIAN Hong, YU Kaixiang, XU Zhihui, SU Xiaoyan. Research on Digital Control Reliability of Pump Groups Under Different Redundancy Modes[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(2):314–326. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022062

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核电厂数字化化学与容积控制系统上充功能的可靠性分析

Reliability Analysis of Charging Function of Digital Chemistry and Volume Control System in Nuclear Power Plant

原子核物理评论. 2020, 37(4): 924–934 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020072>

基于动态故障树的核电站蒸汽发生器液位控制系统可靠性研究

Research on Reliability of Nuclear Power Plant Steam Generator Liquid Level Control System Based on Dynamic Fault Tree

原子核物理评论. 2021, 38(4): 479–486 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021043>

基于PSA敏感性分析的核电稳压器数字控制系统可靠性研究

Research on the Reliability of Digital Control System in Nuclear Power Plants Based on PSA Sensitivity

原子核物理评论. 2021, 38(3): 355–360 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020081>

CiADS固态功率源的可用性设计与分析

Availability Designs and Analyses of Solid-state Amplifiers for CiADS

原子核物理评论. 2018, 35(3): 287–293 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.03.287>

CiADS超导直线加速器超导腔失效的分段补偿与冗余设计

Piecewise Compensation and Redundancy Design for Superconducting Cavity Failure of CiADS Linac

原子核物理评论. 2019, 36(1): 62–70 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.062>

硅探测器的数字化脉冲形状甄别

Digital Pulse Shape Discrimination for Silicon Detector

原子核物理评论. 2017, 34(2): 177–183 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.177>

文章编号: 1007-4627(2023)02-0314-13

不同冗余模式下泵组数字化控制可靠性研究

钱虹^{1,2}, 于凯翔^{1,†}, 徐志辉³, 苏晓燕^{1,2}

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090;

2. 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090;

3. 核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东 深圳 518172)

摘要: 冗余泵组广泛存在于核电厂各关键部分, 对于核电安全方面极为重要。为提高其可靠性, 对冗余泵组数字化控制不同冗余模式下的可靠性进行建模并比较分析。首先根据冗余泵组数字化控制系统在三种冗余模式下不同的运行和控制逻辑建立泵组失效的动态故障树模型。其次, 采用最小割集法并建立 Markov 模型得到三种模式下动态故障树的求解方式。最后, 以核电厂 RCV 系统上充泵数字化控制系统为例, 对其在三种冗余模式下的可靠性进行定量分析。研究结果表明: 在正常运行工况下, 上充泵数字化控制的双热备用冗余模式可靠性为三者最高, 冷热备用冗余模式的可靠性居中, 双冷备用冗余模式的可靠性最低。本文的研究可以为提高冗余泵组数字化控制的可靠性提供参考。

关键词: 冗余泵组; 数字化控制系统; 可靠性; 动态故障树; Markov 模型

中图分类号: TL362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022062

0 引言

泵广泛存在于核电厂各热力循环中, 为冷却剂等介质提供动力, 保证其对反应堆的冷却功能, 如反应堆冷却剂系统的反应堆冷却剂泵、化学和容积控制系统 (Reactor Chemical and Volume control system, RCV) 的上充泵等, 对于核电厂核电安全方面极为重要。核电厂中泵主要以冗余泵组的形式存在^[1], 而泵组又有双热备用、冷热备用和双冷备用等冗余模式, 冗余泵组数字化控制不同冗余模式下实现控制的可靠性不同, 因此需对其可靠性进行建模并比较分析。从核电厂运行的安全性出发, 对不同冗余模式下的数字化控制的可靠性进行分析, 将为泵组数字化控制系统的设计提供有效依据。

在数字化控制可靠性研究方面, 文献[2-3]多是基于数字化控制系统 (Digital I&C System, DCS) 如处理器、输入输出卡件、电源和传感器等单一功能设备的可靠性分析, 很少考虑 DCS 其他功能设备如机柜、I/O 接口等的可靠性。在可靠性建模和分析方面, 文献[4]提出两种新的传统数字化保护系统冗余配置改进方案, 并基于 GO 法进行建模分析。文献[5]基于故障树可靠性分析法, 对田湾核电站数字化反应堆保护系统进行建模分

析。文献[6]同样采用故障树可靠性分析法对核电厂反应堆功率数字化控制系统进行可靠性分析。文献[7]采用可靠性框图对核电厂非安全级仪控系统冗余控制器的架构配置进行可用率计算。以上故障树可靠性分析法均是静态故障模式下的可靠性建模分析, 但静态模式下的建模无法准确反映系统动态过程。在冗余泵组研究方面, 文献[8]虽采用动态建模, 但只对上充泵数字化控制系统的无冗余模式和冷热备用冗余模式的可靠性进行了比较分析。文献[9]虽采用动态建模, 但仅对单个泵和高阶单冗余泵组的可靠性进行了比较分析。以上对冗余泵组的研究未考虑泵组的多种冗余模式。综上, 目前对冗余泵组以及数字化控制可靠性的研究存在的问题主要有: 对 DCS 中机柜和 I/O 接口等关键设备失效考虑较少, 大多采用无法反映系统动态过程的静态故障树可靠性分析法, 且对泵组多种冗余模式的研究不足。

针对上述问题, 本文基于多种设备的多种信号指令, 在正常运行工况的前提条件下, 从 DCS 实现控制的可靠性角度出发, 以冗余泵组运行失效为顶事件, DCS 机柜、I/O 设备等关键设备失效为底事件, 根据冗余泵组数字化控制系统在不同冗余模式下不同的运行和控制逻辑, 建立双热备用、双冷备用和冷热备用三种冗余模

收稿日期: 2022-05-16; 修改日期: 2022-07-31

基金项目: 上海市青年科技启明星计划项目 (21QA1403400); 上海市自然科学基金项目 (19ZR1420700)

作者简介: 钱虹 (1967-), 女, 上海人, 教授, 博士, 从事火电和核电站控制系统和故障诊断研究; E-mail: qianhong.sh@163.com

† 通信作者: 于凯翔, E-mail: 422314022@qq.com

式下的动态故障树模型，采用最小割集法并建立 Markov 模型进行冗余泵组数字化控制在三种冗余模式下可靠性的比较分析，旨在指导冗余泵组在不同应用场合下的冗余模式的设计。

1 核电厂冗余泵组的控制

1.1 冗余泵组

核电厂冗余泵组结构如图 1 所示，其中 002PO 为工作泵，001PO 和 003PO 为备用泵，备用泵分为冷备用和热备用。正常运行工况下，冷备用不启动，热备用启动成功后正常运行但不投入使用。

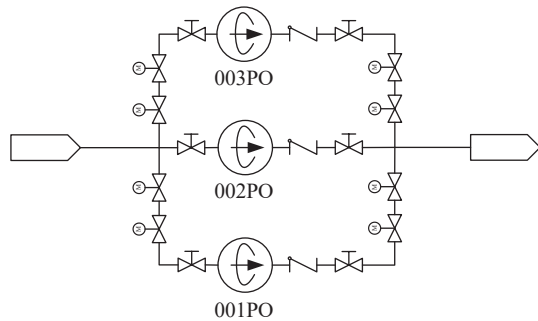


图 1 核电厂冗余泵组示意图

1.2 冗余泵组数字化控制系统

冗余泵组数字化控制系统结构^[10-11]如图 2 所示。当工作泵停止运行时，其停止状态信号通过 I/O 接口传入 DCS 一层机柜 DPU，后者将自动控制备用泵投入使用，保证冗余泵组的正常功能，其过程如图 3 所示。

如图 3(a) 所示，当两个备用泵均为热备用时，机柜 DPU 发送切换指令，通过 I/O 接口传入第一个热备用完成切换。当 I/O 接口或机柜 DPU 失效导致切换失效或泵体本体故障导致泵体停止运行时，其状态信号再次通过 I/O 接口传入机柜 DPU，后者将自动控制第二个热备用投入使用，其过程与第一个热备用投入使用过程相同。

如图 3(b) 所示，当两个备用泵均为冷备用时，在切换过程执行前需先执行启动过程。若启动成功，则启动成功状态信号通过 I/O 接口传入 DCS 一层机柜 DPU，后者再执行切换过程，冷备用启动成功后的切换过程与热备用的切换过程相同。当 I/O 接口或机柜 DPU 失效导致启动失效或切换失效，或者泵体本体故障导致泵体停止运行时，其状态信号再次通过 I/O 接口传入机柜 DPU，后者将自动控制第二个冷备用投入使用，其过程与第一个冷备用投入使用过程相同。

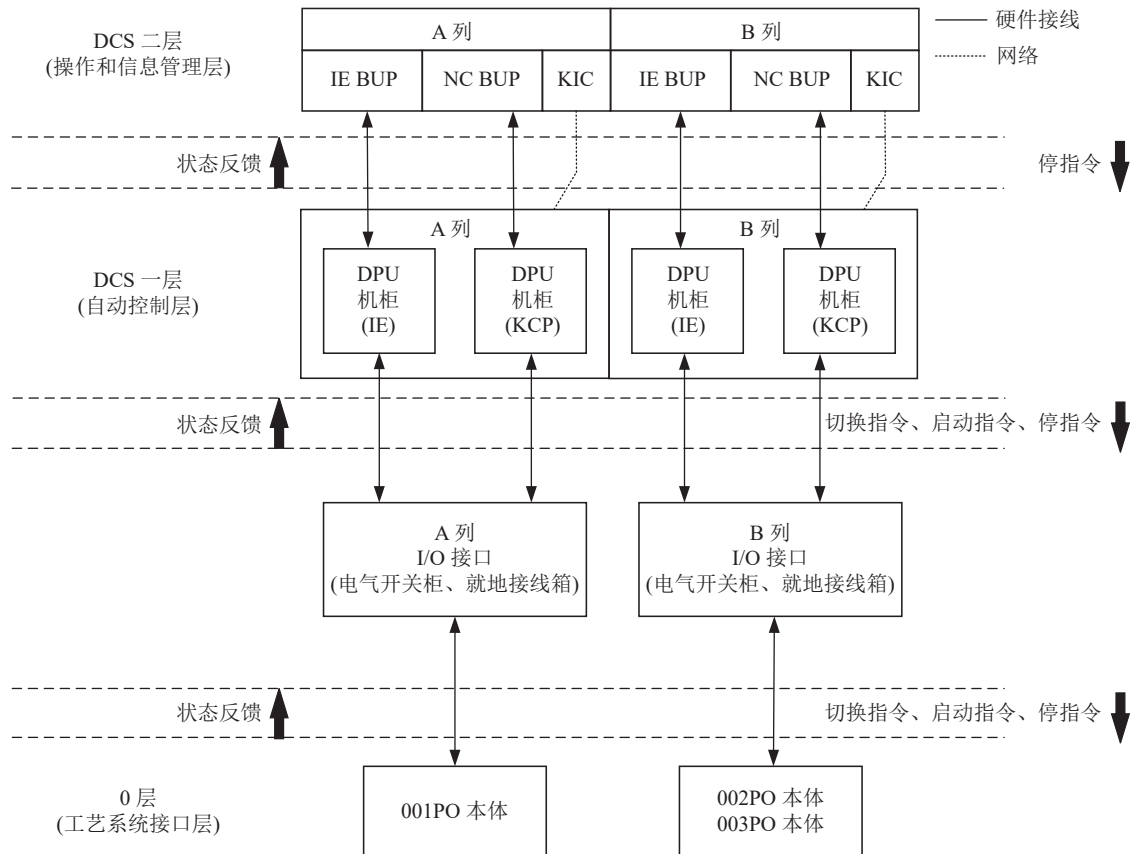
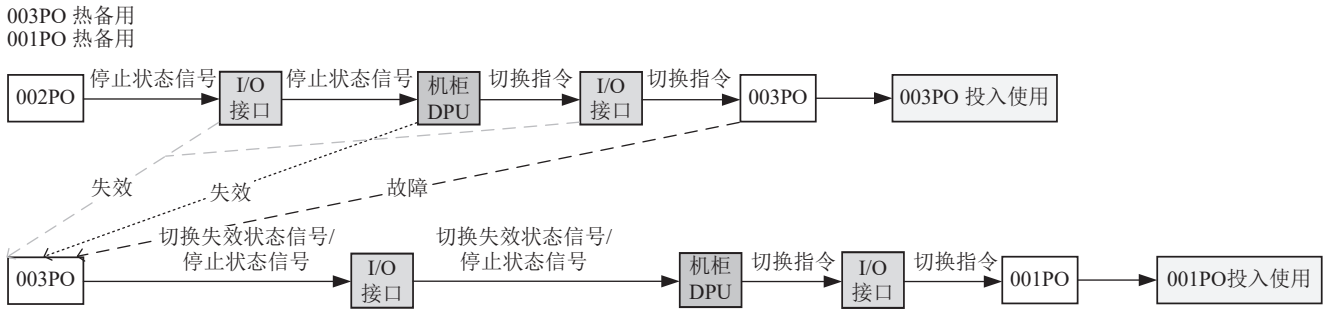
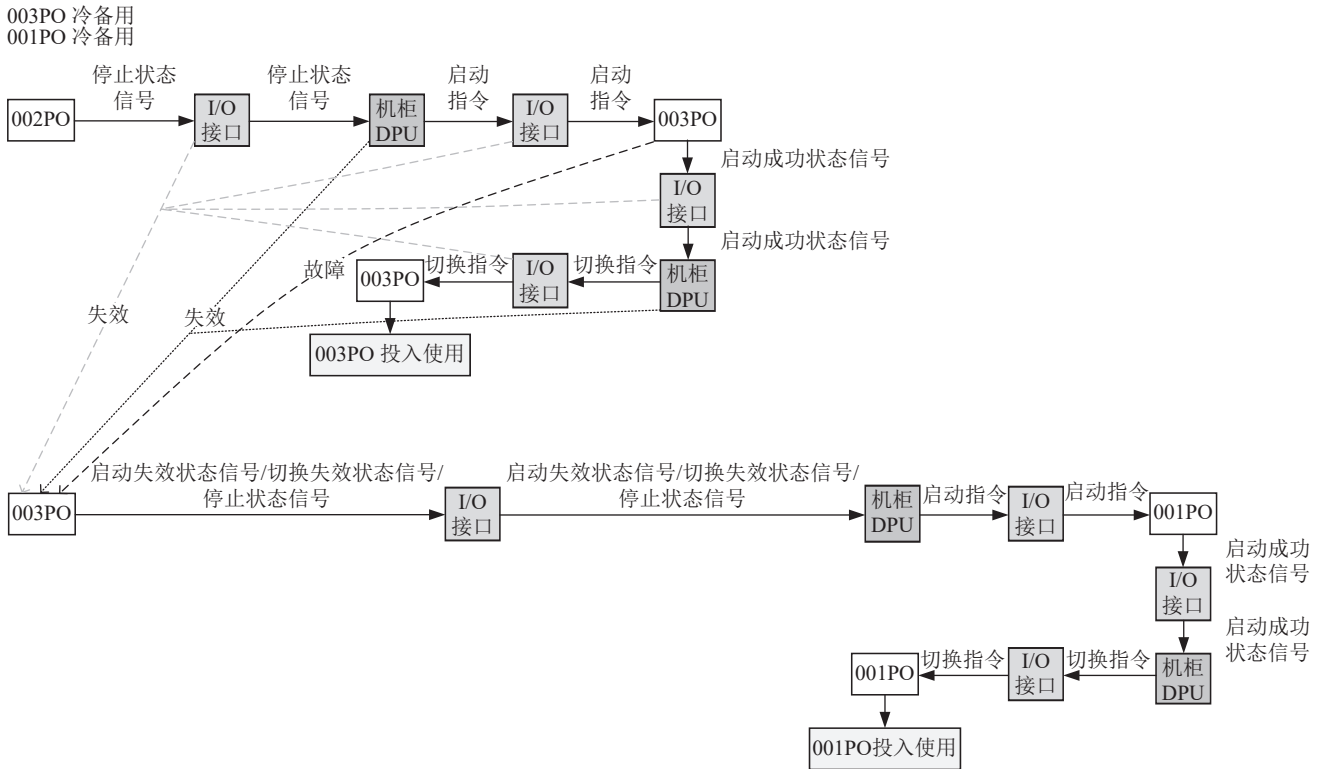


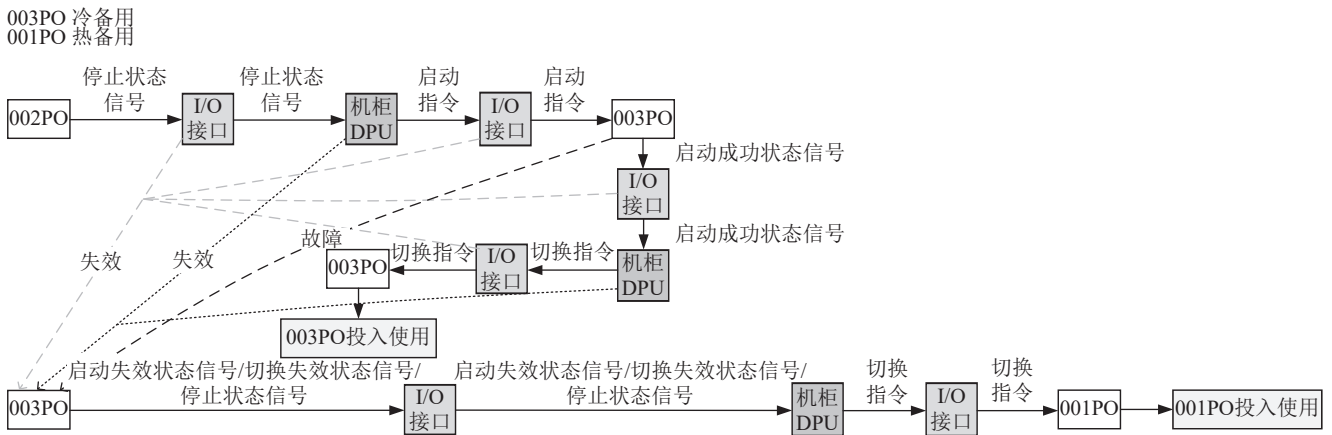
图 2 冗余泵组数字化控制系统示意图



(a) 双热备用冗余模式



(b) 双冷备用冗余模式



(c) 冷热备用冗余模式

图 3 DCS 控制冗余泵组备用泵投入使用过程 (在线彩图)

如图 3(c) 所示，当第一个备用泵为冷备用、第二个备用泵为热备用时，冷备用投入使用过程与图 3(b) 的过程相同，热备用投入使用过程与图 3(a) 的过程相同。

2 基于动态故障树的冗余泵组数字化控制可靠性建模

2.1 建模条件

本文对 DCS 关键设备进行可靠性评价，需要明确其建模条件，其中不考虑执行机构的共因故障，建模条件如下：

- 1) 考虑开发人员在软件开发过程中出现的逻辑编制错误；
- 2) 考虑 DCS 一层自动控制层机柜、电器开关柜、就地接线箱和泵体等关键设备的硬件故障；
- 3) 只考虑 DCS 的自动动作，不考虑 DCS 二层操作和信息管理层的人为操作。

2.2 冗余泵组数字化控制动态故障树可靠性模型的建立

冗余泵组数字化控制中对冷、热备用的控制逻辑可用动态逻辑门优先与门^[12]表示，因此采用动态故障树模型^[12]分析系统的可靠性。

2.2.1 双热备用冗余模式

此模式下，002PO 正常运行时，003PO 和 001PO 也在运行。若 002PO 运行失效，则 003PO 投入使用；若 003PO 也失效，则 001PO 投入使用；若 001PO 也失效，则冗余泵组运行失效。故选择两个优先与门来表示顶事件 T 与中间事件 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 之间的逻辑关系。冗余泵组运行失效的动态故障树模型如图 4 所示。

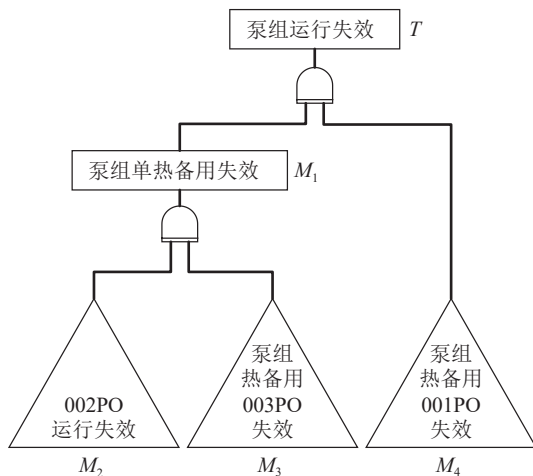


图 4 冗余泵组运行失效的动态故障树模型(双热备用冗余模式)

002PO 正常运行时，DCS 二层停指令误触发和 002PO 设备故障二者中的任意一个事件发生，都会导致 002PO 运行失效，故选择或门来表示中间事件 M_2 和底事件 X_1 、 X_2 之间的逻辑关系。002PO 运行失效的故障树模型如图 5 所示。因为 003PO 和 001PO 运行失效的触发逻辑与 002PO 基本相同，所以中间事件 M_2 、 M_6 、 M_8 的故障树模型相似。

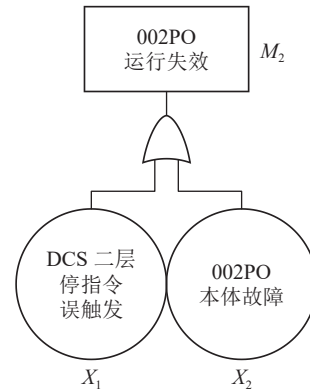


图 5 002PO 运行失效的故障树模型

002PO 运行失效后，DCS 切换热备用 003PO 失效和 003PO 运行失效二者中的任意一个事件发生，都会导致 003PO 失效，故选择或门来表示中间事件 M_3 、 M_5 、 M_6 之间的逻辑关系。DCS 切换热备用 003PO 的过程中，DPU 失效、I/O 失效和 003PO 设备故障三者中的任意一个事件发生，都会导致 DCS 切换热备用 003PO 失效，故选择或门来表示中间事件 M_5 和底事件 X_3 、 X_4 、 X_5 之间的逻辑关系。003PO 失效的故障树模型如图 6 所示。因为 001PO 失效的触发逻辑与 003PO 基本相同，所以中间事件 M_3 和 M_4 、 M_5 和 M_7 的故障树模型相似。001PO 失效的故障树模型如图 7 所示。

根据上述各故障子树的建立与分析，可得到冗余泵组运行失效的完整动态故障树模型，如图 8 所示。

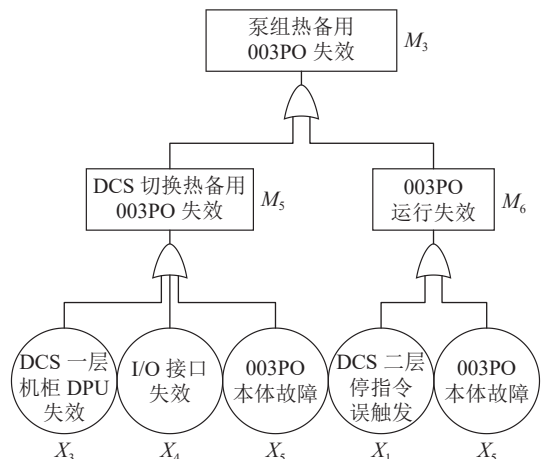


图 6 热备用 003PO 失效的故障树模型

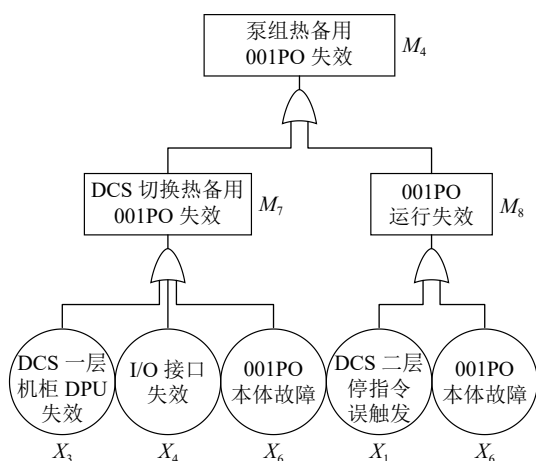


图 7 热备用 001PO 失效的故障树模型

2.2.2 双冷备用冗余模式

此模式下，002PO 正常运行时，003PO 和 001PO 都不运行。若 002PO 运行失效，则启动 003PO，启动成功后投入使用；若 003PO 也失效，则启动 001PO，启动成

功后投入使用；若 001PO 也失效，则冗余泵组运行失效。

冷备用失效与热备用失效的不同之处在于，启动失效、切换失效和运行失效三者中的任意一个事件发生，都会导致冷备用失效。与切换失效的触发逻辑相似，DCS 启动冷、热备用的过程中，DPU 失效、I/O 失效和设备故障三者中的任意一个事件发生，都会导致 DCS 启动冷、热备用失效。由于启动失效已考虑到设备故障，故此处的切换失效便不再考虑设备故障。冗余泵组运行失效的完整动态故障树模型如图 9 所示。

2.2.3 冷热备用冗余模式

此模式下，002PO 正常运行时，001PO 也在运行而 003PO 不运行。若 002PO 运行失效，则启动 003PO，启动成功后投入使用；若 003PO 也失效，则 001PO 投入使用；若 001PO 也失效，则冗余泵组运行失效。冗余泵组运行失效的完整动态故障树模型如图 10 所示，由双冷备用冗余模式下的子故障树 M9 和双热备用冗余模式下的子故障树 M4 组成。

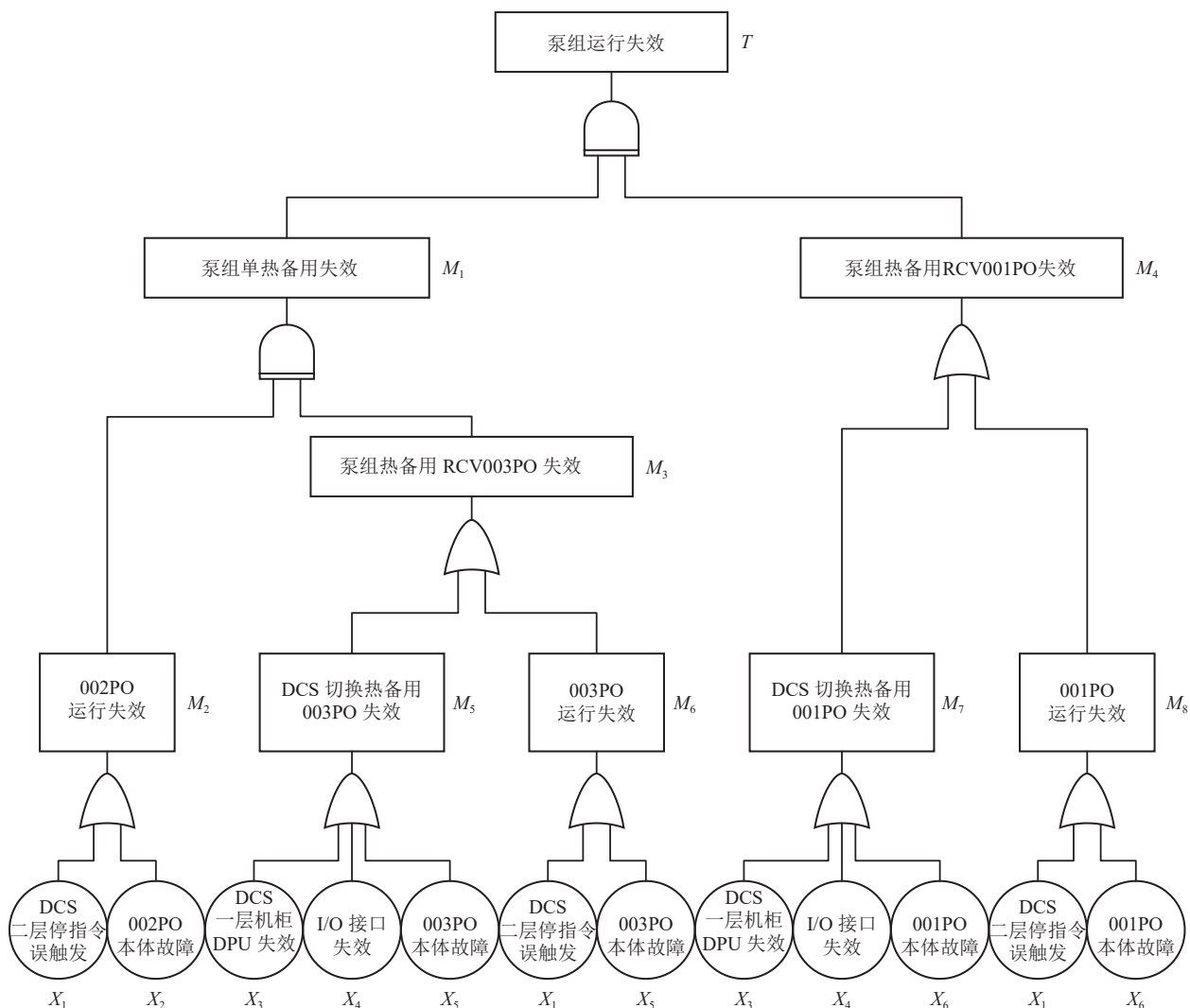


图 8 冗余泵组运行失效的完整动态故障树模型(双热备用冗余模式)

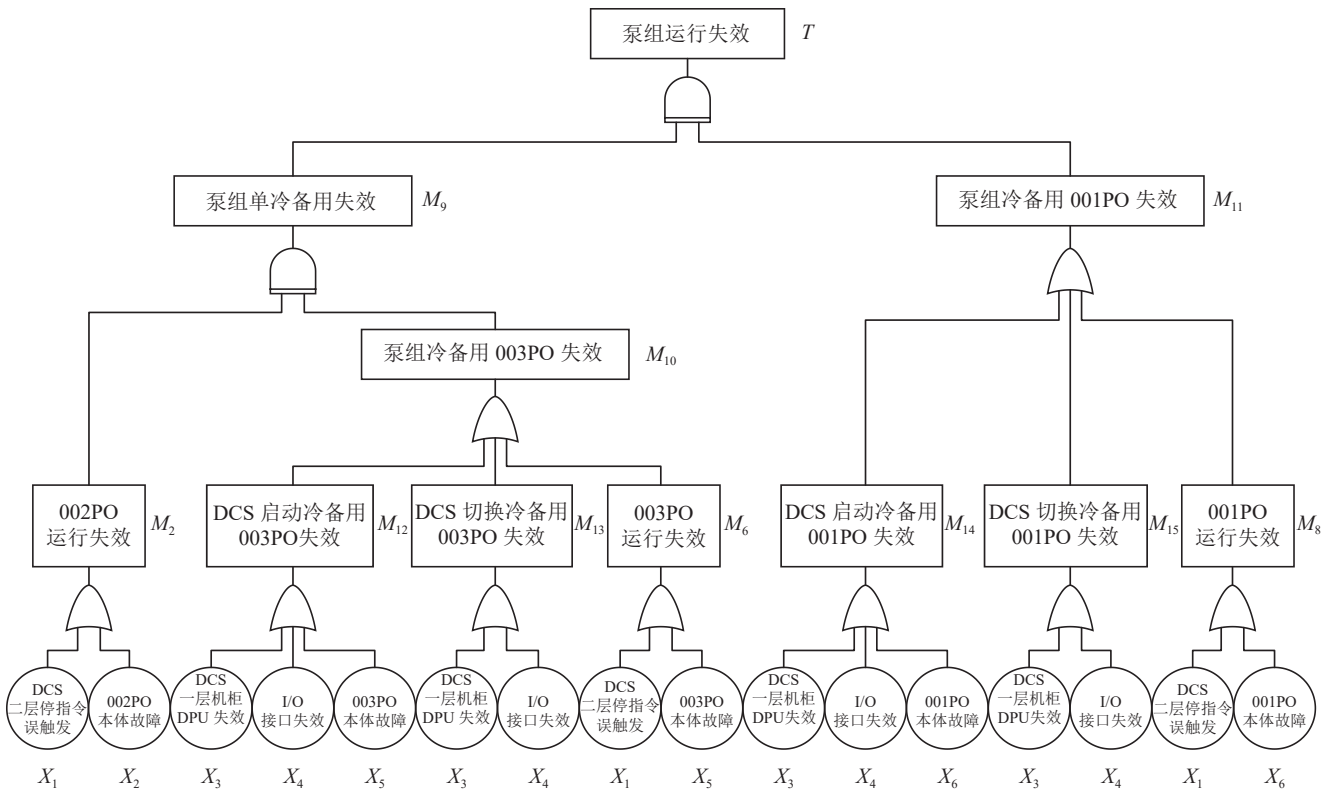


图 9 冗余泵组运行失效的完整动态故障树模型(双冷备用冗余模式)

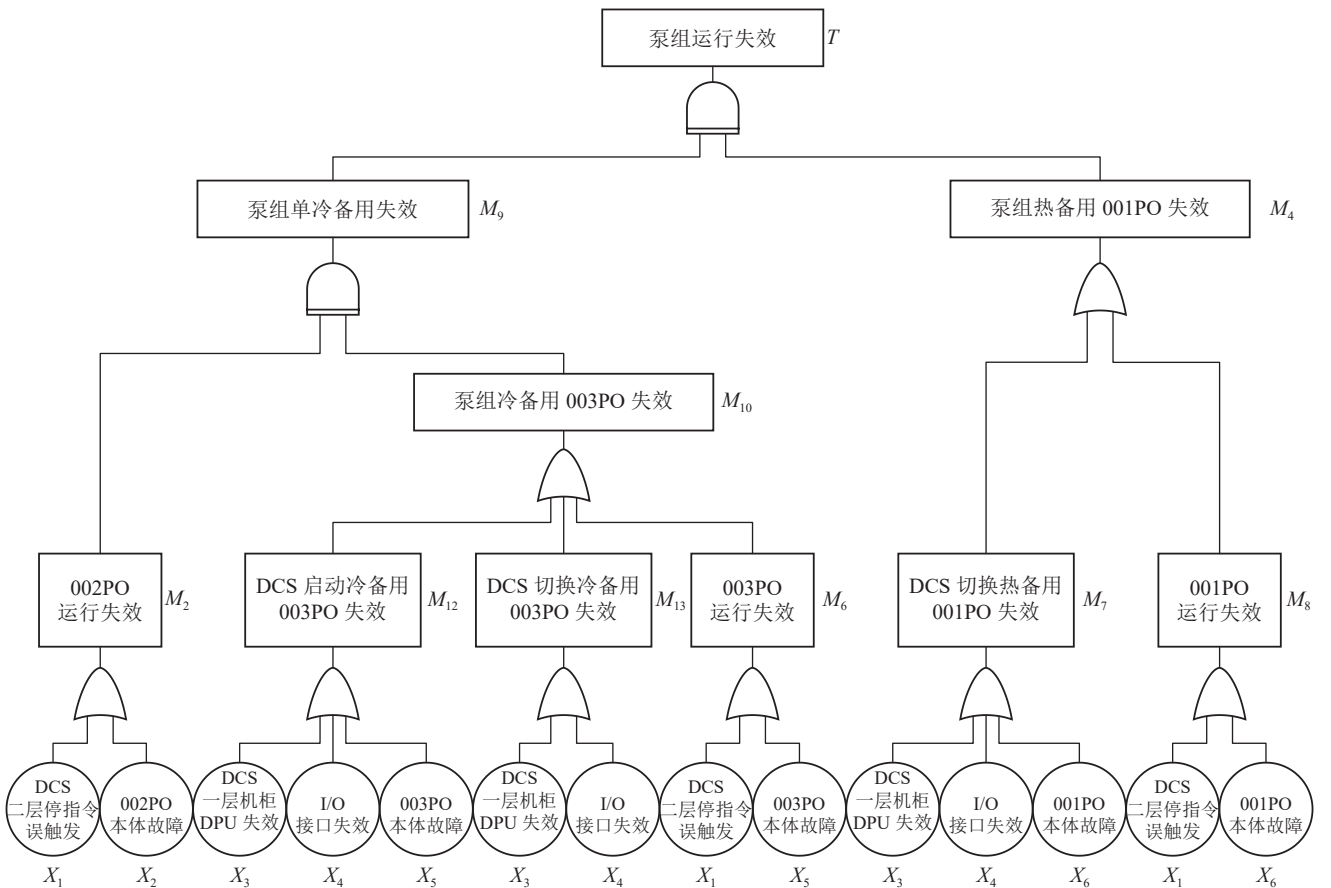


图 10 冗余泵组运行失效的完整动态故障树模型(冷热备用冗余模式)

3 基于 Markov 模型的动态故障树求解

本文先根据底事件的发生概率计算静态子树 M_2 、 $M_5 \sim M_8$ 、 $M_{12} \sim M_{15}$ 的发生概率，再采用 Markov 模型求解三种不同冗余模式下顶事件 T 的发生概率。

3.1 Markov 模型

Markov 模型^[13]由一组概率 P_{ij} 来定义， P_{ij} 表示系统由状态 i 转移到状态 j 的概率。根据状态方程：

$$P(t+1) = P(t) \times A, \quad (1)$$

再确定时间 t 即可求得事件在 t 时刻发生的概率。式中： $P(t)$ 为 t 时刻各状态概率的行向量； $P(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻各状态概率的行向量； A 为 P_{ij} 构成的齐次状态转移矩阵。

3.2 基于最小割集的静态子树分析

为了便于动态故障树的求解，本文采用最小割集法^[7]先计算完整故障树的静态子树发生概率。以 RCV003PO 失效的故障子树 M_5 为例，可求得 M_5 的最小割集为 $C_1 = \{X_3\}$ ； $C_2 = \{X_4\}$ ； $C_3 = \{X_5\}$ ，其中 $X_i (i=3, 4, 5)$ 为图 6 中故障子树 M_5 对应标号的基本事件，由此可得 M_5 的发生概率 P_{M_5} ：

$$P_{M_5} = P(C_1 + C_2 + C_3) = 1 - (1 - P_{X_3})(1 - P_{X_4})(1 - P_{X_5}). \quad (2)$$

同理可得：

$$\begin{aligned} P_{M_2} &= 1 - (1 - P_{X_1})(1 - P_{X_2}), \\ P_{M_6} &= 1 - (1 - P_{X_1})(1 - P_{X_5}), \\ P_{M_7} &= 1 - (1 - P_{X_3})(1 - P_{X_4})(1 - P_{X_6}), \\ P_{M_8} &= 1 - (1 - P_{X_1})(1 - P_{X_6}), \\ P_{M_{12}} &= 1 - (1 - P_{X_3})(1 - P_{X_4})(1 - P_{X_5}), \\ P_{M_{13}} &= 1 - (1 - P_{X_3})(1 - P_{X_4}), \\ P_{M_{14}} &= 1 - (1 - P_{X_3})(1 - P_{X_4})(1 - P_{X_6}), \\ P_{M_{15}} &= 1 - (1 - P_{X_3})(1 - P_{X_4}). \end{aligned} \quad (3)$$

3.3 Markov 模型的建立

对于动态故障树的求解，本文采用 Markov 模型。动态故障树模型中包含的动态逻辑门为优先与门。本文考虑到热备用的切换失效、运行失效两种失效状态以及冷备用的启动失效、切换失效、运行失效三种失效状态，比只考虑一种或两种失效状态建立的 Markov 链更复杂，但求解顶事件的失效概率更准确。

3.3.1 双热备用冗余模式

此模式下的 Markov 链如图 11 所示，图中圆圈代表系统当前时刻的状态，有向线段代表状态的转移方向。每个状态均有如状态 S_1 处表示转移后状态不变的有向线段，为使 Markov 链便于观察，除状态 S_1 外其他状态处的此类有向线段均未画出。

图中共有 18 种状态，与设备状态一一对应的关系见表 1。根据图 11 可得 18×18 状态转移矩阵，如式 (4) 所示。

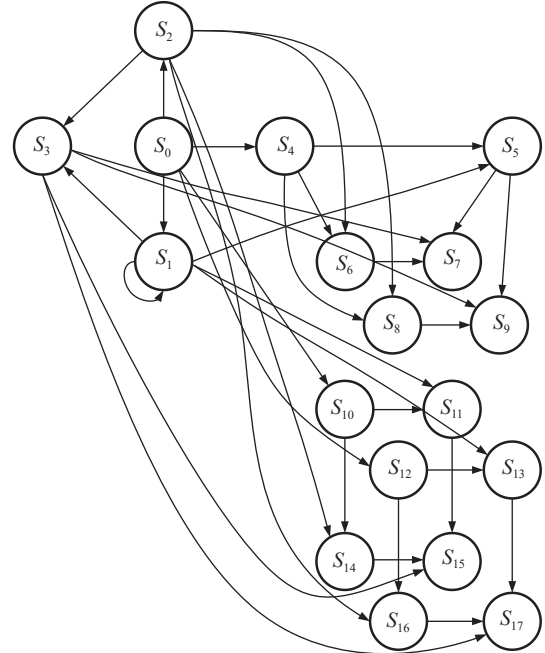


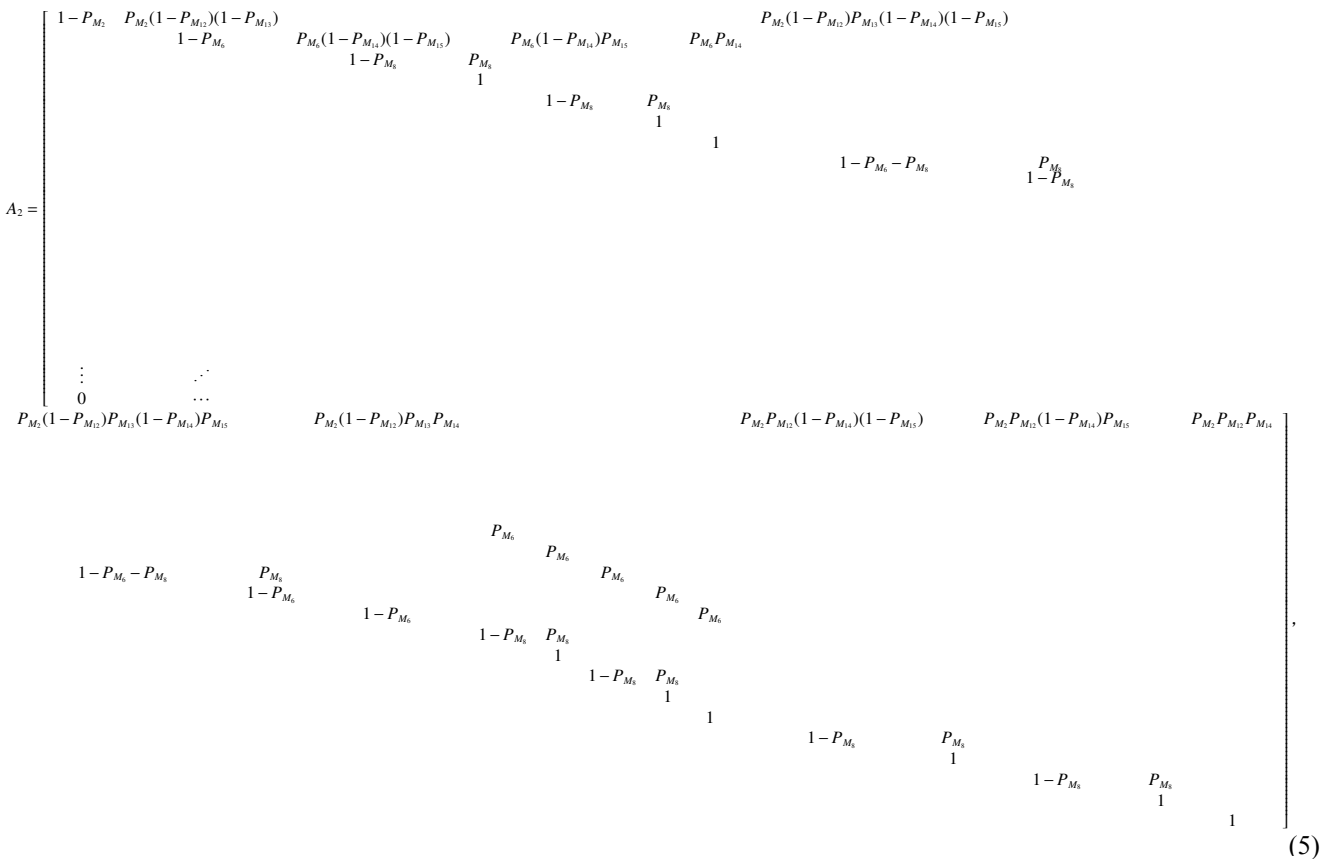
图 11 双热备用冗余模式下的 Markov 链

表 1 双热备用冗余模式下 Markov 链中各状态说明

状态	002PO	003PO(热备用)	001PO(热备用)
S_0	运行正常	未切换/运行正常	未切换/运行正常
S_1	运行正常	未切换/运行正常	未切换/运行失效
S_2	运行正常	未切换/运行失效	未切换/运行正常
S_3	运行正常	未切换/运行失效	未切换/运行失效
S_4	运行失效	切换成功/运行正常	未切换/运行正常
S_5	运行失效	切换成功/运行正常	未切换/运行失效
S_6	运行失效	切换成功/运行失效	切换成功/运行正常
S_7	运行失效	切换成功/运行失效	切换成功/运行失效
S_8	运行失效	切换成功/运行失效	切换失效/运行正常
S_9	运行失效	切换成功/运行失效	切换失效/运行失效
S_{10}	运行失效	切换失效/运行正常	切换成功/运行正常
S_{11}	运行失效	切换失效/运行正常	切换成功/运行失效
S_{12}	运行失效	切换失效/运行正常	切换失效/运行正常
S_{13}	运行失效	切换失效/运行正常	切换失效/运行失效
S_{14}	运行失效	切换失效/运行失效	切换成功/运行正常
S_{15}	运行失效	切换失效/运行失效	切换成功/运行失效
S_{16}	运行失效	切换失效/运行失效	切换失效/运行正常
S_{17}	运行失效	切换失效/运行失效	切换失效/运行失效

表 2 双冷备用冗余模式下 Markov 链中各状态说明

状态	002PO	003PO(冷备用)	001PO(冷备用)
S_0	运行正常	未启动/未切换/未运行	未启动/未切换/未运行
S_1	运行失效	启动成功/切换成功/运行正常	未启动/未切换/未运行
S_2	运行失效	启动成功/切换成功/运行失效	启动成功/切换成功/运行正常
S_3	运行失效	启动成功/切换成功/运行失效	启动成功/切换成功/运行失效
S_4	运行失效	启动成功/切换成功/运行失效	启动成功/切换失效/运行正常
S_5	运行失效	启动成功/切换成功/运行失效	启动成功/切换失效/运行失效
S_6	运行失效	启动成功/切换成功/运行失效	启动失效/未切换/未运行
S_7	运行失效	启动成功/切换失效/运行正常	启动成功/切换成功/运行正常
S_8	运行失效	启动成功/切换失效/运行正常	启动成功/切换成功/运行失效
S_9	运行失效	启动成功/切换失效/运行正常	启动成功/切换失效/运行正常
S_{10}	运行失效	启动成功/切换失效/运行正常	启动成功/切换失效/运行失效
S_{11}	运行失效	启动成功/切换失效/运行正常	启动失效/未切换/未运行
S_{12}	运行失效	启动成功/切换失效/运行失效	启动成功/切换成功/运行正常
S_{13}	运行失效	启动成功/切换失效/运行失效	启动成功/切换成功/运行失效
S_{14}	运行失效	启动成功/切换失效/运行失效	启动成功/切换失效/运行正常
S_{15}	运行失效	启动成功/切换失效/运行失效	启动成功/切换失效/运行失效
S_{16}	运行失效	启动成功/切换失效/运行失效	启动失效/未切换/未运行
S_{17}	运行失效	启动失效/未切换/未运行	启动成功/切换成功/运行正常
S_{18}	运行失效	启动失效/未切换/未运行	启动成功/切换成功/运行失效
S_{19}	运行失效	启动失效/未切换/未运行	启动成功/切换失效/运行正常
S_{20}	运行失效	启动失效/未切换/未运行	启动成功/切换失效/运行失效
S_{21}	运行失效	启动失效/未切换/未运行	启动失效/未切换/未运行



3.3.3 冷热备用冗余模式

此模式下的 Markov 链如图 13 所示, 每个状态均有如状态 S_1 处表示转移后状态不变的有向线段, 为使 Markov 链便于观察, 除状态 S_1 外其他状态处的此类有

向线段均未画出。

图中共有 20 种状态, 与设备状态一一对应的关系见表 3。根据图 13 可得 20×20 状态转移矩阵, 如式 (6) 所示。

3.4 基于 Markov 模型的动态子树分析

设初始条件:

$$\begin{aligned} P_1(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \\ P_2(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \\ P_3(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $P_1(0)$ 为 1×18 矩阵, $P_2(0)$ 为 1×22 矩阵, $P_3(0)$ 为 1×20 矩阵。

将初始条件 $P_1(0)$ 、 $P_2(0)$ 、 $P_3(0)$ 与状态转移矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 代入式 (1), 可得到各个状态随时间变化的失效概率。其中, 冗余泵组在双热备用冗余模式下运行失效的发生概率 $P_1(t)$ 为该模式下状态 $S_7 \sim S_9$ 、 $S_{11} \sim S_{13}$ 、 $S_{15} \sim S_{17}$ 的时间函数之和; 其在双冷备用冗余模式下运行失效的发生概率 $P_2(t)$ 为该模式下状态 $S_3 \sim S_6$ 、 $S_8 \sim S_{11}$ 、 $S_{13} \sim S_{16}$ 、 $S_{18} \sim S_{21}$ 的时间函数之和; 其在冷热备用冗余模式下运行失效的发生概率 $P_3(t)$ 为该模式下状态 $S_5 \sim S_7$ 、 $S_9 \sim S_{11}$ 、 $S_{13} \sim S_{15}$ 、 $S_{17} \sim S_{19}$ 的时间函数之和。

4 RCV 系统上充泵数字化控制可靠性评估

本文以压水堆核电厂 RCV 系统上充回路上充泵为例, 运用上文构建的冗余泵组数字化控制系统可靠性模型, 结合上充泵的运行方式^[14]和上充泵数字化控制的逻辑^[8], 对 RCV 系统上充泵数字化控制的可靠性进行评估。

4.1 可靠度计算

假定设备失效率为常数, 如果计算使命时间内设备的不可靠性, 则对于 i 部件的故障概率公式^[2]为

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad (8)$$

式中: λ_i 表示 i 部件的失效率。设备的可靠度公式^[2]为

$$R(t) = 1 - P(t). \quad (9)$$

4.2 计算结果分析

本文对 RCV 系统上充泵数字化控制可靠性的分析中, 考虑了三台上充泵的动态特性, 相较于未考虑上充泵冷、热备用的系统静态故障树的可靠性分析, 动态故障树对系统的可靠性分析更符合核电厂的实际情况。以下定量分析上充泵数字化控制在不同冗余模式下的可靠度。

基本事件失效率列于表 4, 其中各控制柜的失效率参考了文献^[3]中机柜代表单元内含模块的数量及其失效率。

表 4 基本事件失效率

设备	失效率
停指令误触发	$\lambda_1 = 2.06 \times 10^{-7}$ ^[15]
泵的本体故障	$\lambda_2 = 1.08 \times 10^{-5}$ ^[16]
机柜 DPU 失效	$\lambda_3 = 8.45 \times 10^{-6}$ ^[3]
I/O 接口失效	$\lambda_4 = 1.72 \times 10^{-5}$ ^[3]

将表 4 的失效率和式 (8) 代入式 (2)、式 (3) 中, 得到静态子树 M_2 、 $M_5 \sim M_8$ 、 $M_{12} \sim M_{15}$ 的发生概率函数如下:

$$\begin{aligned} P_{M_2} &= P_{M_6} = P_{M_8} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}, \\ P_{M_5} &= P_{M_7} = P_{M_{12}} = P_{M_{14}} = 1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}, \\ P_{M_{13}} &= P_{M_{15}} = 1 - e^{-(\lambda_3 + \lambda_4)t}. \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (10) 代入状态转移矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 , 可得到上充泵在三种冗余模式下运行失效的发生概率 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 、 $P_3(t)$, 再利用式 (9) 可求出上充泵在三种冗余模式下的可靠度 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $R_3(t)$ 随时间变化的曲线, 如图 14 所示。可观察到在 0~200 000 h 运行时间内, 上充泵数字化控制在三种冗余模式下的可靠度有明显区别, 且在双热备用冗余模式下的可靠度最高; 在 200 000~600 000 h 运行时间内, 该控制在三种冗余模式下的可靠度区别不明显, 说明模型对于此段运行时间内不同冗余模式下控制可靠度的区分度较低, 仍有改进空间。

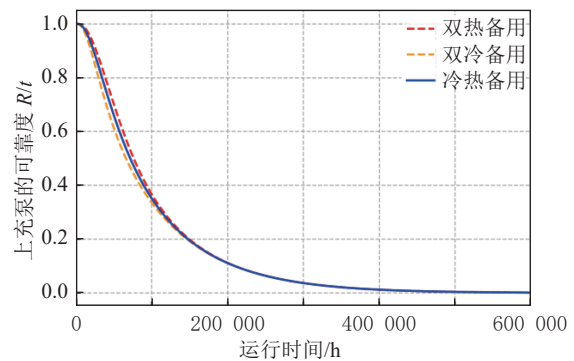


图 14 上充泵的可靠度对比 (在线彩图)

5 结论

本文提出的一种核电厂冗余泵组数字化控制的可靠性研究方法, 将该方法运用于实例中得到如下结论: 在正常运行工况下, 以系统的可靠度作为分析指标, 核电厂 RCV 系统上充泵数字化控制的双热备用冗余模式可靠性为三种冗余模式中最高, 冷热备用冗余模式的可靠性居中, 双冷备用冗余模式的可靠性最低。这一研究结果为核电厂冗余泵组提供一定的设计依据。

本研究方法可为可靠性研究提供一定的参考, 但该方法在动态故障树模型建立的过程中侧重于 DCS 关键

设备对DCS实现控制的可靠性的影响,亦可从网络或软件等特殊失效模式方向综合考虑,可使得改进后的可靠性模型对于不同模式下可靠性的区分度更高。

参考文献:

- [1] HUANG Tao, CAI Qi, ZHAO Xinwen, et al. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(1): 5. (in Chinese)
(黄涛, 蔡琦, 赵新文, 等. 核动力工程, 2009, 30(1): 5.)
- [2] QIAN Hong, GU Yaqi, LIU Xinjie. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(3): 103. (in Chinese)
(钱虹, 古雅琦, 刘鑫杰. 核动力工程, 2019, 40(3): 103.)
- [3] WANG Hao, YU Jiawei, ZHOU Shiliang, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(12): 2330. (in Chinese)
(王浩, 余嘉炜, 周世梁, 等. 原子能科学技术, 2017, 51(12): 2330.)
- [4] XIAO Fei, LYU Feipeng. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 142. (in Chinese)
(肖飞, 吕飞鹏. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 142.)
- [5] ZHOU Haixiang, WANG Weiguo. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(6): 1272. (in Chinese)
(周海翔, 王卫国. 核电子学与探测技术, 2009, 29(6): 1272.)
- [6] ZHOU Shiliang, LIU Yuyan, DU Wen. Nuclear Science and Engineering, 2013, 33(4): 419. (in Chinese)
(周世梁, 刘玉燕, 杜文. 核科学与工程, 2013, 33(4): 419.)
- [7] ZONG Shufeng, HU Lisheng, HAN Yinchu, et al. Industrial Control Computer, 2017, 30(4): 48. (in Chinese)
(宗树枫, 胡立生, 韩寅驰, 等. 工业控制计算机, 2017, 30(4): 48.)
- [8] WANG Yuanyuan, XU Simin, YANG Ting, et al. Nuclear Physics Review, 2020, 37(4): 924. (in Chinese)
(王媛媛, 徐思敏, 杨婷, 等. 原子核物理评论, 2020, 37(4): 924.)
- [9] GUO Qiang, ZHAO Xinwen, CAI Qi, et al. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(1): 43. (in Chinese)
(郭强, 赵新文, 蔡琦, 等. 核动力工程, 2011, 32(1): 43.)
- [10] SHEN Haitao. Instrument User, 2016, 23(8): 76. (in Chinese)
(沈海涛. 仪器仪表用户, 2016, 23(8): 76.)
- [11] LI Min. Response of Loss of Offsite Power of NPP[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
(李旻. 核机组失去厂外电源的应急响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.)
- [12] DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2011, 31(19): 105. (in Chinese)
(戴志辉, 王增平, 焦彦军. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105.)
- [13] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. General Principles of Reliability Analysis for Nuclear Power Plant Safety Systems: GB/T 9225-1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
(国家质量技术监督局. 核电厂安全系统可靠性分析一般原则: GB/T 9225—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.)
- [14] ZHENG Lixin, SUN Shuhai, TAO Shusheng, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(12): 2189. (in Chinese)
(郑丽馨, 孙树海, 陶书生, 等. 原子能科学技术, 2015, 49(12): 2189.)
- [15] ZHAO Xinwen, GUO Haikuan, CAI Qi, et al. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(4): 122. (in Chinese)
(赵新文, 郭海宽, 蔡琦, 等. 核动力工程, 2020, 41(4): 122.)
- [16] LI Zhihong. Research on Dynamic Reliability Analysis Method of Nuclear Power Plant System Based on CS-DFT[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
(李治宏. 基于CS-DFT的核电站系统动态可靠性分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.)

Research on Digital Control Reliability of Pump Groups Under Different Redundancy Modes

QIAN Hong^{1,2}, YU Kaixiang^{1,†}, XU Zhihui³, SU Xiaoyan^{1,2}

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Power Plant Automation Technology, Shanghai 200090, China;

3. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen 518172, Guangdong, China)

Abstract: Redundant pump groups are widely used in various critical parts of nuclear power plants and play a vital role in ensuring nuclear safety. To enhance their reliability, this study models and analyzes the reliability of digital control of redundant pump groups under different redundancy modes. Firstly, a dynamic fault tree model of pump group failure is established based on the different operation and control logic of the digital control system for redundant pump groups under three redundancy modes. Secondly, the minimum cut-set method is employed, and a Markov model is constructed to obtain the solution approach for the dynamic fault tree under three modes. Finally, taking the digital control system for charging pumps in the RCV system of a nuclear power plant as a case study, the reliability of the system is quantitatively analyzed under the three redundancy modes. The research results indicate that, under normal operating conditions, the double hot standby redundancy mode exhibits the highest reliability for the digital control of charging pumps, followed by the cold-hot standby redundancy mode, while the double cold standby redundancy mode shows the lowest reliability. The present study provides valuable insights for improving the reliability of digital control for redundant pump groups.

Key words: redundant pump group; digital control system; reliability; dynamic fault tree; Markov model

Received date: 16 May 2022; **Revised date:** 31 Jul. 2022

Foundation item: Youth Science and Technology Star Program of Shanghai(21QA1403400); National Natural Science Foundation of Shanghai (19ZR1420700)

† **Corresponding author:** YU Kaixiang, E-mail: 422314022@qq.com